



Apoio à validação técnica da rede em ambiente de simulação multi-agente de mercados de energia elétrica

ANA CATARINA MARTINS DE FREITAS

Outubro de 2016

Apoio à validação técnica da rede em ambiente de simulação multi-agente de mercados de energia elétrica

Ana Catarina Martins de Freitas

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Informática, Área de Especialização em
Sistemas Gráficos e Multimédia**

Orientador: Prof. Doutora Isabel Praça

Co-orientador: Doutor Tiago Pinto

Júri:

Presidente:

[Nome do Presidente, Categoria, Escola]

Vogais:

[Nome do Vogal1, Categoria, Escola]

[Nome do Vogal2, Categoria, Escola] (até 4 vogais)

Porto, Outubro de 2016

À minha família

Resumo

O Sector de Energia Elétrica está em constante evolução e torna-se importante estudá-lo com cuidado. O anterior regime de monopólio passou por um processo de completa desverticalização das várias etapas da cadeia de energia: desde a produção à comercialização. Apenas o transporte e distribuição de energia elétrica permaneceram em regime de concessão de uma única entidade. Destas alterações, surgiram os mercados de energia elétrica liberalizados. Devido à constante transformação deste sector, observou-se o aparecimento de diversos simuladores de mercados elétricos, que permitem um estudo aprofundado e realista de várias situações. No entanto, ainda não existe um simulador que permita unir a simulação de mercados elétricos com a simulação de redes elétricas. Para permitir simulações mais abrangentes e poderosas, surgiu este projeto.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma aplicação que permita a criação e edição de redes elétricas, e que interligue as funcionalidades de um simulador de mercados elétricos com algoritmos de análise do trânsito de potências, permitindo assim aliar a perspetiva económica e a gestão técnica dos sistemas elétricos.

Neste documento são descritos os simuladores de mercados já existentes, bem como ferramentas que permitem detetar estrangulamentos na rede e, como meio para atingir o objetivo principal, estudadas quais as melhores ferramentas para construção de uma aplicação que satisfaça o pretendido. São descritos, também, vários casos de estudo que não só ilustram e explicam o uso correto da aplicação como também permitem validar a aplicação e a usabilidade da sua interface gráfica.

Por fim, são elaboradas conclusões sobre os resultados do trabalho, realçando todos os objetivos atingidos e linhas de evolução futura.

Palavras-chave: Mercado de energia elétrica, Sector de Energia Elétrica, rede elétrica, Simulação Multi-agente, Trânsito de potências.

Abstract

The Electric Power Industry is evolving, and has become very important to study it carefully. The previous regime went through a complete liberalization process of the various stages of the energy chain, from production to marketing. Only the transportation and distribution of electricity remained under concession of a single entity. Of these amendments, emerged liberalised electricity markets. Due to the constant transformation of this sector, it was observed the appearance of various electrical markets simulators, which allow an in-depth study and realistic situations. However, there is not yet a simulator that allows simulation of electric markets together with the simulation of electrical networks. To enable more comprehensive and powerful simulations, this project began.

This project has as its main goal the development of an application that provides a graphical user interface to define electrical networks (both creating and editing), to connect to the electrical market simulator with power flow algorithms, allowing to ally the economical perspective and the technical management of electric systems.

In this work are studied the existing electrical market simulators, as well as tools of Power Flows which allows to detect problems in the network. Also, as a way to reach the main goal, are studied which are the best tools to create an interface that satisfy the requirements. To validate the solution, case studies are described. These not only show the best way to use the application but also shows the success of it's construction.

At the end, a conclusion about this work results is made, with the purpose of validate if all goals are reached, enhancing future evolution paths.

Keywords: Electric power Industry, Electricity markets, Power Flow, Electric Network, Multi-agent Simulation.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha Mãe, por sempre me ter incentivado a ser mais e melhor e, apesar de todas as pedras no caminho, me dizia que conseguia. Ao meu Pai. Sem ele isto não poderia ter sido possível. Sem eles não estaria aqui, pelas razões óbvias e pelas menos óbvias também. Aos meus irmãos porque são os meus protetores e os meus abraços seguros desde sempre. Porque dizem que sou pequenina e se disponibilizaram para ler o relatório (mesmo que Informática seja chinês para eles!) e por se rirem de mim quando o trabalho se acumulava e eu me queixava de ter de escrever ainda mais.

Às minhas sobrinhas. À Joana pela expressão confusa com que ficava quando lhe dizia que estava a trabalhar “para a escola” e à Carolina, a pequena da família, por me arrancar sorrisos com as suas expressões de “humano iniciante”.

Ao Fernando Costa que me apoiou durante todo este tempo, mesmo quando o cansaço acumulava nas suas costas. Por ler o relatório imparcialmente e por descobrir e se rir de frases que não faziam sentido. Pelo apoio e pela motivação, por tudo.

Uma vez que Bruce Dickinson e Stephen King agradecem aos seus gatos nos seus CD’s e livros, vou fazer o mesmo: Obrigada à Sininho e ao Chiquinho. Especialmente ao Chiquinho, que tem um gosto especial em estar no meu colo enquanto eu trabalho.

À minha orientadora, a Dr^a Isabel Praça. Sem ela, certamente, não estaria aqui hoje a escrever os agradecimentos, com a tese terminada. Porque, já me acompanhou no estágio da licenciatura e sempre me animou, mesmo nas alturas em que o trabalho era demasiado. Pela dedicação que sempre demonstrou, à qual estou agradecida, com todo o meu coração.

Ao meu co-orientador, Dr. Tiago Pinto pela dedicação, por toda a paciência e ajuda. Ouviu as minhas perguntas e sempre esteve disponível para me ajudar, para dar palavras amigas e positivas, pelas quais estou imensamente agradecida.

Ao professor Sérgio Ramos por toda a colaboração e ajuda num tema que não me era desconhecido (e assustador!).

Ao professor João Paulo Pereira por toda a ajuda que deu, todas as horas que passou comigo com todas as minhas questões sobre interfaces e esquemas, mesmo depois de INDES.

Ao Fábio Loureiro que releu vezes sem conta o meu relatório e que sempre me fez rir no momento certo. Por me dizer vezes sem conta que o trabalho estava “*show dji bola*” e que “só falta mais um bocadinho”. À Helena Araújo, companheira de licenciatura, companheira de mestrado, companheira de *pizza*, de *escape games*, de gatos e de filmes.

O meu mais sincero obrigado a todos.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivos.....	1
1.2	Contributos	2
1.3	Apresentação da Organização.....	3
1.4	Estrutura	4
2	Contexto	5
2.1	Sistemas Elétricos	5
2.1.1	Trânsito de potências	6
2.1.2	Constituintes da Rede Elétrica.....	7
2.2	Mercado de Energia Elétrica.....	9
2.2.1	Entidades	9
2.2.2	Despacho Económico e Despacho Técnico	10
2.3	Problema a resolver.....	11
3	Estado da Arte	13
3.1	Ferramentas de cálculo de Trânsito de Potências.....	13
3.1.1	PowerWorld	14
3.1.2	CYMFLOW	15
3.2	Simuladores de Mercado de Eletricidade.....	16
3.2.1	MASCEM	16
3.2.2	PowerWeb	18
3.2.3	AMES.....	19
3.2.4	EMCAS	19
3.2.5	TEMMAS	20
3.3	Análise de Valor	21
3.3.1	Proposta de Valor	21
3.3.2	Benefícios e Sacrifícios para o Cliente	21
3.3.3	Cenários de Negócio	22
3.3.4	Modelo de Negócio de Canvas.....	22
3.3.5	Analisar, modelar e quantificar a criação de valor	24
4	Ferramentas e Tecnologias.....	25
4.1	Application Programming Interface	25
4.1.1	HERE	25
4.1.2	OpenStreetMap e JMAPViewer	27
4.1.3	GMap.NET.....	28
4.1.4	Análise comparativa	29
4.1.5	Conclusão.....	30
4.2	Tecnologias.....	30
4.2.1	Windows Forms	31

4.2.2	Windows Presentation Foundation	31
4.2.3	XAML - Extensible Application Markup Language	32
4.2.4	Análise comparativa: WPF vs <i>Windows Forms</i>	33
4.3	Conclusão	34
5	Análise Técnica	35
5.1	Metodologia de Desenvolvimento.....	35
5.2	Modelo de Domínio	36
5.3	Requisitos	37
5.3.1	Requisitos não funcionais	38
5.3.2	Requisitos Funcionais	38
5.4	Estrutura da Aplicação	40
5.4.1	Arquitetura	40
5.4.2	Padrão MVVM.....	41
6	Implementação.....	43
6.1	Sequência de interação.....	43
6.2	Interface	44
6.3	Solução	48
6.3.1	Ficheiros	52
6.4	GMap.NET	57
6.4.1	Mapa	58
6.4.2	Barramentos.....	60
6.4.3	Linhas.....	63
6.4.4	Tutorial.....	65
6.5	Teste de desenvolvimento	71
7	Casos de Estudo.....	75
7.1	Caso de estudo 1 - Rede “virtual” de 6 barramentos	75
7.1.1	Cenário 1.....	77
7.1.2	Cenário 2.....	81
7.2	Caso de estudo 2 - Produção Distribuída	85
7.3	Caso de estudo 3 - <i>Microgrid</i> com dados reais	91
8	Conclusão e Perspetivas de Trabalho Futuro	95
8.1	Contributos	95
8.2	Limitações e Trabalho Futuro	96
8.2.1	Undo/Redo	97
8.2.2	Arrastar elementos.....	97
8.2.3	Nomes dos elementos visíveis.....	97
8.3	Apreciação Final.....	97

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo do modelo em π de uma linha de transmissão [8].....	8
Figura 2 – Interface do <i>Power World</i> [11]	14
Figura 3 – CYMFLOW [12]	15
Figura 4 - Principais características do MASCEM [14].....	17
Figura 5 – Gráfico de energia comprada [15]	18
Figura 6 - Arquitetura do TEMMAS [20].....	20
Figura 7 – Modelo de Negócio de Canvas	23
Figura 8 – Interface HERE [26]	26
Figura 9 – Mapa 3D [28]	27
Figura 10 – Interface <i>JMAPViewer</i>	28
Figura 11 – Interface da demonstração de GMAP.NET.....	29
Figura 12 – Principais características do WPF [33]	31
Figura 13 - Metodologia em estrela.....	36
Figura 14 - Modelo de Domínio	37
Figura 15 – Diagrama de Casos de Uso	39
Figura 16 – Arquitetura	40
Figura 17 – Diagrama de interação entre camadas. [37]	41
Figura 18 – Sequência de interação	44
Figura 19 – Interface final da aplicação.	45
Figura 20 – <i>Virtual Network</i>	47
Figura 21 – Interface inicial	47
Figura 22 – Menu flutuante de criação de Barramento.....	48
Figura 23 - Comunicação entre <i>View</i> e <i>Model</i> da janela <i>PlayerWindow</i>	48
Figura 24 – Representação de duas janelas de criação de agentes: à esquerda num barramento do tipo “PQ” e à direita num barramento do tipo “PV”	50
Figura 25 – Janela de inserção de novo tipo de agente	51
Figura 26 – Janela de eliminação de agentes	51
Figura 27 - Folha de barramentos.....	52
Figura 28 - Folha dos agentes.....	52
Figura 29 - Folha das linhas	53
Figura 30 - Vendedores	54
Figura 31 - Compradores.....	54
Figura 32 - Folha 1.....	55
Figura 33 – Folha 2.....	55
Figura 34 - Folha 4.....	56
Figura 35 - Folha 5.....	57
Figura 36 - Folha 6.....	57
Figura 37 - Janela de criação do barramento	65
Figura 38 - Representação de barramento no mapa	66

Figura 39 - Criação de agentes	66
Figura 40 - Pop-up com dados do barramento	67
Figura 41 - Janela de criação de linha de transmissão.....	67
Figura 42 - Linha desenhada entre dois barramentos	68
Figura 43 - Janela de edição de barramento	68
Figura 44 - Janela de resultados	70
Figura 45 - <i>Pop-up</i> de informação do barramento	71
Figura 46 - <i>Combobox</i> de escolha de período	71
Figura 47 - Visualização da Rede	76
Figura 48 - Resultados do Mercado	77
Figura 49 - Perfil de vendedores.....	77
Figura 50 - Perfil de compradores	78
Figura 51 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 5º período.....	79
Figura 52 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 5º período.....	80
Figura 53 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 5º período.....	81
Figura 54 - Resultados de Mercado	81
Figura 55 - Perfil dos vendedores	82
Figura 56 - Perfil dos compradores.....	82
Figura 57 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 9º período.....	83
Figura 58 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i>	84
Figura 59 - Representação visual da rede	86
Figura 60 - Resultados de Mercado	87
Figura 61 - Perfil dos vendedores	87
Figura 62 - Perfil dos compradores.....	88
Figura 63 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 11º período.....	89
Figura 64 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 24º período.....	90
Figura 65 - Resultados do Mercado	92
Figura 66 - Perfis de consumidores.....	92
Figura 67 - Perfis de geração	93
Figura 68 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do 11º período.....	93
Figura 69 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de <i>Power Flow</i> do período 23	94

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Análise comparativa entre as várias APIs.....	30
Tabela 2 - Análise comparativa de WPF e <i>Windows Forms</i>	33
Tabela 3 - Descrição dos testes de desenvolvimento	72
Tabela 4 - Características das linhas de transmissão	76
Tabela 5 - Dados das linhas de transmissão para o 5º período.....	78
Tabela 6 - Dados das linhas de transmissão para o 10º período.....	79
Tabela 7 - Dados das linhas de transmissão para o 24º período.....	80
Tabela 8 - Dados das linhas de transmissão para o 9º período.....	83
Tabela 9 - Dados alterados das linhas de transmissão para o 24º período	84
Tabela 10 - Características das linhas de transmissão	85
Tabela 11 - Dados das linhas de transmissão para o 11º período.....	88
Tabela 12 - Dados das linhas de transmissão para o 24º período.....	89
Tabela 13 - Características das linhas de transmissão	91

Lista de Excertos de Código

Código 1 - Criação de dois elementos em XAML	32
Código 2 - Criação de dois elementos em C#	32
Código 3 - Atributos da classe <i>PowerGrid</i>	49
Código 4 - Atributos da classe <i>Bus</i>	49
Código 5 - Propriedades de um objeto <i>Player</i>	50
Código 6 - Inicialização de propriedades do mapa	58
Código 7 - Evento <i>MouseRightButtonUp</i>	60
Código 8 - Menu flutuante do barramento	61
Código 9 - Criação de barramento	61
Código 10 - Desenhar imagem na tela	62
Código 11 - Criação da lista	63
Código 12 - Adição da linha ao mapa	64
Código 13 - Criação de linha e adição à Canvas	64

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

AMES	<i>Agent-based Modeling of Electricity Systems</i>
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
API	<i>Application programming interface</i>
EDP	Energias de Portugal
EMCAS	<i>Electricity Market Complex Adaptive System</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GECAD	Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
JADE	<i>Java Agent Development Framework</i>
MASCEM	<i>Multiagent Simulator of Competitive Electricity Markets</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
OAA	<i>Open Agent Architecture</i>
PAAMS	<i>Practical Applications of Agents and Multiagent Systems</i>
REN	Redes Energéticas Nacionais
RND	Rede Nacional de Distribuição
RNT	Rede Nacional de Transporte
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico Português
TEMMAS	<i>The Electricity Market Multi-Agent Simulator</i>
VPP	<i>Virtual Power Player</i>
XAML	<i>Extensible Application Markup Language</i>
WPF	<i>Windows Presentation Foundation</i>

Lista de Símbolos

Ω *Ohms*

θ *Theta*

π Pi

1 Introdução

O Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD) tem uma forte linha de investigação na área de técnicas de inteligência artificial e estudo dos sistemas elétricos de energia. Esta é uma área em que as transformações têm sido constantes, sobretudo desde há algumas décadas atrás com o início da liberalização dos mercados [1]. Esta liberalização deu lugar a complexas interações entre os vários participantes do mercado sendo útil a utilização de ferramentas para uma melhor compreensão do comportamento do mercado e para auxiliar na definição das melhores estratégias de participação no mercado.

Nesta área surgiram alguns simuladores que têm vindo a ganhar relevância nestes últimos anos. Os simuladores são, segundo Shannon e Johannes [2], imitações do mundo real que visam avaliar a estrutura e o comportamento de um sistema e/ou as decisões tomadas nesse sistema. Os simuladores do mercado elétrico têm o mesmo objetivo, existindo simuladores para as várias vertentes do mercado elétrico, tal como apoiar a tomada de decisão e avaliar tipos de leilões [3]. O desenvolvimento de simuladores tornou-se inevitável, sendo uma ajuda preciosa na compreensão do comportamento dos mercados, e por isso gerou-se uma necessidade de simular o seu funcionamento para perceber quais atitudes devem ser tomadas por parte dos participantes. Um mercado de energia não funciona sem uma rede elétrica por onde a distribuição possa ser feita. Por isso, torna-se importante a necessidade de não só simular mercados de energia elétrica como juntar a essa simulação os dados de uma rede elétrica.

1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto consiste na criação de uma aplicação para definição de redes elétricas, que permita interagir com o mercado de energia elétrica (compra e venda de energia) e verificar constrangimentos na rede para potencializar as simulações de mercados de energia elétrica efetuadas no GECAD.

Deve-se, assim, proceder à criação de uma aplicação que permita criar e reconhecer redes de energia elétrica, onde seja possível criar, com ou sem associação a um mapa, barramentos, agentes e linhas de transmissão. Esta interface deve interagir com o cálculo de trânsito de potências (calculado através de algoritmos de *Power Flow*) e com o *Multiagent Simulator of Competitive Electricity Markets* (MASCEM) para que possam ser estudados vários períodos de negociação. Após terminada a simulação de licitações económicas, deve ser possível visualizar na interface gráfica se as restrições técnicas das redes (despacho técnico) são cumpridas ou não e, em caso negativo, deve ser permitido alterar a rede para nova simulação. Este projeto prima pela inovação, uma vez que ainda não existe algo que possibilite a junção da criação de redes elétricas à simulação de mercados elétricos.

1.2 Contributos

No decorrer do projeto foram identificados requisitos essenciais para o desenvolvimento da aplicação final. Primeiramente foi necessário estudar as soluções já existentes, experimentá-las e decidir que tecnologias utilizar. Foi definido que devia ser possível criar redes elétricas com ou sem associação a um mapa, de modo a permitir a criação, simulação e análise, tanto de redes reais, como de redes experimentais que permitam estudar aspectos diferenciados, como por exemplo mercados locais ou redes de testes do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Como objetivo final, para além da criação, exportação e importação de redes para a aplicação, está a comunicação com o MASCEM e com os algoritmos de cálculo de trânsito de potências. Esta junção permite dotar este simulador com uma maior flexibilidade e capacidade de análise técnica das linhas, além do estudo de mercado anteriormente oferecido pelo mesmo. A interface gráfica da aplicação permite a definição de casos de estudo, nomeadamente a definição das características da rede considerada para estudo, e dos agentes de mercado que serão considerados na rede simulada. Além de estabelecer os tipos de agentes que irão participar, poderá ser também definida a sua localização na rede e algumas das suas características.

Por fim, sendo uma solução onde o utilizador tem um grande número de ações que pode executar, seria essencial que a interface fosse intuitiva e simples, com uma grande rapidez de acesso, permitindo assim uma interação fluida entre o utilizador, a aplicação, os algoritmos de *Power Flow*, e o simulador MASCEM.

Portanto, a aplicação deve permitir a criação de redes elétricas com barramentos, agentes e linhas de transmissão e alterar/eliminar cada um dos constituintes da rede. Deve permitir uma manipulação, com facilidade, da rede elétrica, abrangendo a inclusão de agentes MASCEM na rede elétrica, associando automaticamente os agentes aos resultados de mercado, permitindo a criação de vários tipos de agentes que podem ser associados ao simulador MASCEM. Ao criar uma rede deve ser possível colocar os agentes numa dada localização geográfica, no caso das redes reais. A aplicação deve comunicar com o MASCEM e com algoritmos de *Power Flow* verificando se as transações no mercado de energia elétrica, num dado momento, estão de acordo com os limites técnicos da rede, permitindo, desta forma, um melhor apoio à decisão. Deve ser possível importar/exportar a rede utilizando ficheiros *Excel*.

As contribuições deste trabalho representam a base para a criação de um novo agente no MASCEM, com as funções de Operador de Rede. Este agente incorpora as capacidades fornecidas pela aplicação desenvolvida neste trabalho e garante a comunicação e interação com os outros agentes, já existentes, no MASCEM.

Este projeto regista um avanço científico na área das simulações de eletricidade, uma vez que não existe nenhum projeto que una a criação e verificação de restrições técnicas de redes elétricas com simulações de mercados elétricos. Este avanço simboliza a criação de um novo sistema avançado, que liga a capacidade de simulação multi-agente de mercado de energia elétrica à análise técnica da rede. Este sistema providencia também um aumento na interação com o utilizador através da aplicação desenvolvida.

É de salientar a seguinte contribuição científica:

- Ana Freitas, Isabel Praça, Tiago Pinto, Tiago Sousa, Zita Vale. “*Network Operator Agent: Endowing MASCEM Simulator with Technical Validation*”, *Highlights of Practical Applications of Scalable Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection, Communications in Computer and Information Science*, vol. 616, pp. 381-392, Springer International Publishing, 2016.

Esta publicação pode ser visualizada no Anexo I. Estão, também, a ser preparadas mais duas publicações: uma que será submetida como artigo de demonstração na conferência *Practical Applications of Agents and Multiagent Systems* (PAAMS) 2017 e outra para submissão em revista com alto factor de impacto – revista *Energy Policy*, da Elsevier, com submissão planeada para Novembro de 2016.

1.3 Apresentação da Organização

O GECAD é uma unidade de Investigação e Desenvolvimento com sede no Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto (ISEP-IPP) que se dedica à promoção e desenvolvimento de investigação científica no domínio da Inteligência Artificial, Sistemas baseados em Conhecimento e Sistemas de Apoio à Decisão.

Dispõe de duas grandes áreas de investigação: Sistemas Inteligentes e Sistemas de Energia. É uma unidade de I&D conhecida mundialmente, liderando algumas das áreas científicas em que investiga. Tem como missão a promoção e desenvolvimento de investigação científica no domínio das Ciências do Conhecimento e da Decisão com suporte em Tecnologias da Informação e visa colaborar no desenvolvimento de “Sistemas Inteligentes para suporte a uma Sociedade Sustentável, Segura e Inclusiva”.

O reconhecimento do GECAD é visível através de vários indicadores, como os mais de 50 projetos de I&D, nacionais e internacionais, em que tem participado, e através de dezenas de publicações anuais de artigos científicos e números especiais nas mais credenciadas revistas internacionais das áreas de atuação do GECAD.

1.4 Estrutura

A organização desta dissertação está dividida em oito capítulos, servindo este primeiro para introduzir o tema proposto, bem como a motivação para a realização deste projeto.

No segundo capítulo é feita a contextualização da dissertação, através do estudo de Sistemas Elétricos e o cálculo de trânsito de potências. São abordados, também, os Mercados de Energia Elétrica.

No terceiro capítulo, é feito o estado de arte, abordando ferramentas de cálculo de trânsito de potências e descrevendo alguns dos mais importantes simuladores de mercados elétricos. É, ainda, feita a análise de valor – resultado final do conteúdo abordado no Módulo de Análise de Valor, no âmbito desta disciplina.

O quarto capítulo é dedicado ao levantamento de tecnologias estudadas para o desenvolvimento do projeto.

O quinto capítulo apresenta a análise técnica deste projecto. Inicialmente é realizada uma descrição sobre a metodologia de desenvolvimento adotada para este projeto. É apresentado o modelo de domínio do problema, os requisitos e a estrutura escolhida para implementação na aplicação.

O sexto capítulo apresenta a implementação do protótipo desenvolvido. É feita uma apresentação da interface gráfica da aplicação, é descrita a solução e a API utilizada no seu desenvolvimento. São, ainda, apresentados um tutorial de uso da aplicação e os testes de desenvolvimento.

No sétimo capítulo serão descritos os casos de estudo realizados à aplicação para verificação final de todos os requisitos.

No oitavo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, as suas limitações e trabalho futuro.

2 Contexto

Neste capítulo é feita uma introdução aos Sistemas Elétricos, dando o exemplo do Sistema Elétrico Nacional (SEN) e é abordado o conceito de trânsito de potências.

É ainda abordado o tema dos Mercados de Energia Elétrica competitivos, as entidades que nele intervêm e a forma como se interligam com a gestão técnica da rede elétrica.

2.1 Sistemas Elétricos

A eletricidade é produzida através de recursos como o carvão, gás natural, gasóleo, água, vento, sol, entre outros. É, tradicionalmente, produzida em centrais elétricas de grande porte, que não estão localizadas próximas dos locais de grande consumo por razões geográficas, técnicas e económicas. Porém, hoje em dia esta produção encontra-se localizada mais próxima dos locais de consumo (produção distribuída) [4].

O SEN divide-se em várias áreas [4][5], destacando-se as seguintes:

- Produção

Existem dois regimes legais de produção: regime ordinário, cuja energia é proveniente de fontes não renováveis e em grandes centros electroprodutores hídricos, e em regime especial, cuja energia é proveniente de fontes de energia renováveis e da cogeração;

- Transporte de eletricidade

A transmissão de eletricidade é feita através da Rede Nacional de Transporte (RNT), mediante uma concessão atribuída pelo Estado Português, em regime de serviço público e de exclusividade à Redes Energéticas Nacionais (REN). A REN liga os produtores aos centros de consumo e assegura o equilíbrio entre a procura e a oferta de energia;

- Distribuição de eletricidade

A energia produzida é entregue à rede de transporte, constituída por linhas de alta tensão. Contudo, através de transformadores, a energia passa nas redes de distribuição em alta, média e baixa tensão, as quais a conduzem aos consumidores finais. A distribuição de eletricidade processa-se através da Rede Nacional de Distribuição (RND) que possui infraestruturas de alta, média e baixa tensão. A distribuição em redes de baixa tensão cabe aos municípios e distribuidores, que estabelecem entre si contratos de concessão. Atualmente, a concessão exclusiva para a atividade de distribuição de eletricidade em alta e média tensão pertence à Energias de Portugal (EDP).

- Comercialização de eletricidade

A comercialização de eletricidade está aberta à concorrência. Os comercializadores podem comprar e vender eletricidade livremente. Neste sentido, podem aceder às redes de transmissão e distribuição mediante o pagamento de tarifas fixadas pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). Em relação ao Mercado, os consumidores podem escolher o seu fornecedor, sem qualquer encargo adicional com a mudança de comercializador;

- Consumo de eletricidade

Esta etapa equivale ao consumo final da eletricidade. Segundo fonte da REN em 2013 em Portugal Continental, existiam cerca de 6.1 milhões de consumidores, sendo a sua maioria em baixa tensão, 23 500 em média tensão e 350 em alta e muito alta tensão;

- Operação dos Mercados de eletricidade

O mercado organizado corresponde a um sistema que proporciona o encontro de oferta e procura de energia por parte de consumidores e produtores, organizados em mercados grossistas e pela compra direta de eletricidade aos produtores (contratos bilaterais).

2.1.1 Trânsito de potências

Um sistema de energia ideal pode ser visto como um copo com água: a água que é retirada deve ser recolocada sem exceder os limites do copo e diminuir a água que este contém. Num sistema de energia elétrica, geradores fornecem energia e as cargas retiram essa energia para consumo sem exceder os limites impostos pelo sistema.

O trânsito de potências corresponde à solução, em regime estacionário, de um sistema de energia elétrica abrangendo os elementos que o compõem, sendo, por exemplo geradores, cargas e a própria rede (impedância da rede). O seu cálculo, neste caso, é feito através de algoritmos de *Power Flow*.

É um tema muito estudado devido à sua utilidade para as várias áreas dos Sistemas Elétricos, nomeadamente, na sua análise. É utilizado intensamente nas fases de planeamento, projeto e

exploração de uma rede elétrica. A partir dos anos 50, o estudo do trânsito de potências intensificou-se, tendo sido desenvolvidas várias técnicas para a sua resolução. [3]

Estudos sobre trânsito de potências são de grande importância pois permitem desenhar uma expansão futura do Sistema de Energia Elétrica (SEE), bem como clarificar qual a melhor forma de operar nos sistemas existentes. [6]

Normalmente, os estudos recaem em simulações com diferentes cenários, o que permite perceber se o SEE está adequado para satisfazer critérios de performance. Para isso, existe *software* de análise de trânsito de potências.

Quando se pretende tomar decisões sobre a futura estrutura e constituição do sistema, é necessário simular o seu comportamento em diversas circunstâncias. Em particular, o trânsito de potências é incluído nas situações seguintes:

- Expansão do sistema produtor;
- Decisões sobre expansão e reforço do sistema de transporte;
- Expansão e reforço de redes de distribuição;
- Estudos de interligação.

2.1.2 Constituintes da Rede Elétrica

A Rede de Energia Elétrica, como é dito por José Pedro Sucena Paiva, docente do IST, “é a máquina mais complexa jamais concebida por cientistas e engenheiros” [7]. Durante a maior parte do tempo, a rede funciona em boas condições, contudo pode tornar-se instável devido à ocorrência de incidentes que levam à perda de produção ou pelo congestionamento das linhas de transmissão, por exemplo.

Neste contexto são abordados dois tipos de redes elétricas: reais e virtuais. As redes reais são redes que existem fisicamente. As redes virtuais são vistas como redes de testes (e.g. redes IEEE), muitas delas resultantes da simplificação de redes reais.

Neste subcapítulo serão enumerados os constituintes da rede elétrica.

2.1.2.1 Barramentos

O Barramento é entendido como o ponto de ligação dos sistemas de produção e das cargas consumidoras, sendo igualmente o ponto de interligação entre diferentes valores de tensão num sistema elétrico de energia.

Nos sistemas de energia elétrica existem três tipos de barramentos: PQ, PV e Referência. As suas diferenças são em função das variáveis conhecidas em cada um deles. São consideradas 4

grandezas relativas a cada barramento: potência ativa injetada, potência reativa injetada, módulo da tensão e ângulo da tensão.

Os barramentos tipo PQ são, tipicamente, os que correspondem a barramentos de consumo, nos quais se conhecem as potências ativa e reativa. Correspondem a barramentos em que através do cálculo de potências, é possível chegar aos valores de tensão em módulo e em fase, que dependem das potências geradas noutros barramentos e das perdas no sistema. Estes barramentos são conhecidos, também, como *Load Bus*.

Os barramentos tipo PV correspondem aos barramentos de geração, nos quais são conhecidos os valores da potência ativa injetada e o valor da tensão. A potência reativa, gerada nestes barramentos e o valor do ângulo da tensão são calculados de forma a garantir o valor da tensão. Correspondem às centrais, onde se estipula o valor da potência ativa produzida da tensão (em módulo), que pode ser controlada pela excitação das máquinas. Estes barramentos são conhecidos, também, como *Generator Bus*.

Os barramentos do tipo Referência (PRef) têm como objetivo garantir o equilíbrio entre a potência gerada, as potências de carga e as perdas do sistema. O valor de referência é, geralmente, considerado nulo apesar de poder ser considerado qualquer outro valor. Neste barramento, não se conhece a potência injetada gerada, especificando-se os valores de tensão (tal como nos PV) e do ângulo da tensão (normalmente $\theta=0$). Estes barramentos são conhecidos, também, como *Swing Bus*.

2.1.2.2 Linhas de Transmissão

As linhas elétricas permitem o transporte de energia entre locais, como por exemplo entre uma central e um consumidor.

As principais características elétricas de uma linha de transporte são: impedância (resistência e reactância) e admitância, que representa o inverso da impedância e reflete as correntes de fuga das linhas de transporte.

Na generalidade dos casos, utiliza-se o modelo unifilar em π para linhas curtas, onde a impedância $Z=R+jX$ (Ω) é o produto da impedância linear pelo comprimento da linha. A capacidade, ou admitância vem de $Y=jB$ (S), ilustrado na Figura 1.

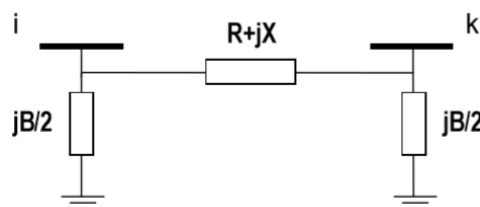


Figura 1 - Exemplo do modelo em π de uma linha de transmissão [8]

2.1.2.3 Cargas

As cargas são equipamentos ligados numa rede elétrica que consomem a energia recebida através da mesma, como por exemplo, o posto de transformação do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

A principal característica de uma carga é a quantidade de energia que consome.

2.1.2.4 Geradores

Um gerador converte energia mecânica em energia elétrica. Obriga a corrente elétrica a fluir através de um circuito externo e fornecem quase toda a potência para redes de energia elétrica que alimentam as residências nos dias de hoje.

As principais características aquando a sua criação numa rede são a sua potência ativa e reativa.

2.2 Mercado de Energia Elétrica

No âmbito do processo de liberalização dos mercados, em que as atividades de transmissão e distribuição de redes se consideram monopólios naturais e são objeto de regulação económica, a produção e a comercialização de eletricidade estão abertas à concorrência, com a justificação económica de introduzir maior eficiência na gestão e operação dos recursos afetos a estas atividades.

Esta comercialização é feita livremente e podem realizar-se transações intracomunitárias de eletricidade nos termos previstos da lei. As transações passam pelas entidades presentes na produção para assegurarem a venda e as entidades que necessitam abastecer-se de eletricidade procurarem adquiri-la, seja para satisfazer a carteira de fornecimentos a clientes finais ou para consumo próprio.

A estas atividades principais o modelo de liberalização do sector elétrico veio acrescentar a existência de mercados organizados, que se constituem como plataformas de negociação tendencialmente independentes dos agentes tradicionais que atuam nas atividades de produção e de comercialização de eletricidade.

Os mercados de eletricidade são ambientes complexos que envolvem várias entidades. A energia elétrica é transacionada entre essas entidades que tentam alcançar maior lucro, mesmo existindo limitações ao nível da rede, pelas suas características e limites.

2.2.1 Entidades

Os mercados de eletricidade são compostos por diversas entidades que atuam sobre ele.

2.2.1.1 Agentes de mercado

Consideram-se agentes de mercado todos aqueles que participam no mercado de energia elétrica. Normalmente são vendedores ou compradores, dependendo se a sua postura é de compra ou de venda. Os vendedores representam entidades que produzem, ou representam produtores de energia para vender no mercado. Os compradores podem ser consumidores de energia, distribuidores, entre outros.

2.2.1.2 Operador de Mercado

O Operador de Mercado faz a análise das propostas feitas pelos agentes de mercado e define o preço de mercado e o despacho económico (conjunto de ofertas de compra e venda aceites), de acordo com o mecanismo de mercado em vigor.

2.2.1.3 Operador de Sistema

O Operador de Sistema é o responsável pela gestão da rede elétrica, recebe o despacho económico definido pelo Operador de Mercado e faz os cálculos de trânsito de potências que lhe está associado, para garantir que acordos económicos são viáveis e que todas as limitações técnicas da rede serão respeitadas.

2.2.2 Despacho Económico e Despacho Técnico

Para que a estabilidade da rede elétrica seja assegurada, existem o despacho económico e o despacho técnico que os Operadores de Mercado e de Sistema devem garantir que são cumpridos.

2.2.2.1 Despacho Económico

Num mercado de bolsa, o Operador de Mercado recebe propostas de compra e venda de energia elétrica, normalmente para cada hora ou meia hora do dia seguinte. Essas propostas incluem os valores disponíveis de potência e o preço mínimo a receber (no caso de propostas de venda) ou o preço máximo a pagar (no caso de propostas de compra). Este Operador procede ao encontro destas propostas, construindo um despacho puramente económico para cada intervalo de tempo (habitualmente períodos de uma ou de meia hora do dia seguinte).

2.2.2.2 Despacho Técnico

O Operador de Sistema tem a função de coordenar tecnicamente a exploração do sistema de energia elétrica. Para tal, deverá receber informação acerca da existência de contratos bilaterais (contrato estabelecido diretamente entre um Produtor e um Consumidor), e sobre os despachos económicos resultantes da atividade dos mercados centralizados. De seguida, o Operador de Sistema deverá proceder a um conjunto de estudos por forma a avaliar a viabilidade técnica do

conjunto contratos/despacho para cada intervalo do dia seguinte, com atenção especial às situações de congestionamento das redes elétricas. Os congestionamentos correspondem a possíveis situações de funcionamento em que diversos equipamentos das redes possuem os seus limites técnicos ultrapassados. Se o conjunto contratos/despacho não originar congestionamentos, a exploração do sistema é viável do ponto de vista técnico. Existindo situações de congestionamento o despacho não é viável e deverá ser sujeito a modificações (normalmente com alteração do despacho económico verificado anteriormente). Caso o despacho técnico seja viável o Operador de Sistema comunica os valores obtidos aos produtores, contrata os níveis necessários de serviços auxiliares (reservas, produção de potência reativa, controlo de tensão, regulação de frequência...) e transmite a informação relativa ao trânsito de potência que irá ocorrer aos proprietários das redes de transporte (no caso português é a REN).

2.3 Problema a resolver

Neste momento, o estudo de mercados elétricos e o cálculo de trânsito de potências é feito de forma independente e manual. O MASCEM (agente Operador de Mercado) e os algoritmos de *Power Flow* (agente Operador de Sistema) são usados em separado, para efectuar as simulações necessárias em que ambos são importantes. Neste sentido, a aplicação descrita neste documento vem colmatar esta limitação, permitindo uma comunicação automática entre ambos, acrescentando valor às simulações através da criação e visualização de redes elétricas. Com isto, visa-se dotar o MASCEM com uma maior flexibilidade e capacidade de análise técnica das linhas e permitir um maior conjunto de casos de estudo tornando mais fácil a visualização de problemas técnicos na rede, através do despacho técnico e do despacho económico.

Desta forma, a aplicação deve permitir a criação, simulação e análise, tanto de redes reais, como de redes experimentais que permitam estudar aspectos diferenciados.

Desta forma, é criado um novo agente – o agente Operador de Rede.

3 Estado da Arte

Este capítulo apresenta o estudo preliminar realizado tendo como objetivo desenvolver e aprofundar as competências e os conhecimentos necessários para o desenvolvimento e fundamentação da ideia proposta.

Inicialmente é feito um estudo a ferramentas de cálculo de trânsito de potências. De seguida são apresentados alguns simuladores de mercados de energia elétrica e, no final o capítulo, é feita a análise de valor desta aplicação.

3.1 Ferramentas de cálculo de Trânsito de Potências

Uma vez que o trânsito de potências é um tema muito estudado devido à sua utilidade para várias áreas dos Sistemas Elétricos, foram criadas aplicações que proporcionam um estudo mais aprofundado e que permitem simulações. Primeiramente irão ser abordadas operações básicas do trânsito de potências.

Os sistemas elétricos podem ser muito diferentes, tanto em tamanho como em constituintes. Contudo, independentemente do tamanho, todos os sistemas elétricos têm como objetivo carregar energia de uma carga, com uma voltagem específica. Podemos, então, dividir o sistema em 3 partes:

- Fonte de energia;
- Carga;
- Sistema de transmissão.

Ou seja, a fonte de energia alimenta a carga através do sistema de transmissão. Como por exemplo, uma lanterna a pilhas: as pilhas são a fonte de energia, a lâmpada é a carga e os fios que ligam os dois são o sistema de transmissão.

As unidades de medida são:

- Voltagem é expressa, normalmente, em kV (kilovolts: 1kV = 1000 volts);
- Corrente é expressa em amps (amperes);
- Potência ativa em MW (Megawatts: 1MW =1 000 000 watts) – é aquela que normalmente se pretende receber de um sistema elétrico;
- Potência reativa em Mvar (Megavars: Megavolt * amps reativa) – Alguns dispositivos, como por exemplo motores, necessitam da potência reativa para excitação dos seus circuitos magnéticos;
- Potência aparente em MVA (Megavars: Megavolt * amps aparente);
- Impedância em Ω (ohms).

De seguida serão abordadas algumas ferramentas de cálculo de trânsito e potências.

3.1.1 PowerWorld

O *PowerWorld* [9] é um simulador interativo de sistemas de energia. É um dos programas de *software* eleitos para a utilização em sistemas reais e também na área de investigação. A elevada robustez dos algoritmos computacionais designadamente das técnicas de cálculo de trânsito de potências, bem como a vantagem de possuir interface permitem o uso deste *software* num contexto real. No entanto, este *software* é comercial pelo que os valores monetários associados às licenças são elevados.

Permite a criação de redes elétricas e a sua posterior análise de trânsito de potências, apresentando no ecrã sugestões de alteração com vista à correta circulação de energia. Permite ainda a exportação das redes criadas. Foi desenhado para simular sistemas de alta tensão, em simulações que podem durar de alguns minutos até alguns dias. A análise de trânsito de potência é bastante eficiente, capaz de resolver sistemas que podem ter até 250 000 barramentos [10]. Na Figura 2 é possível visualizar a interface do *PowerWorld*.

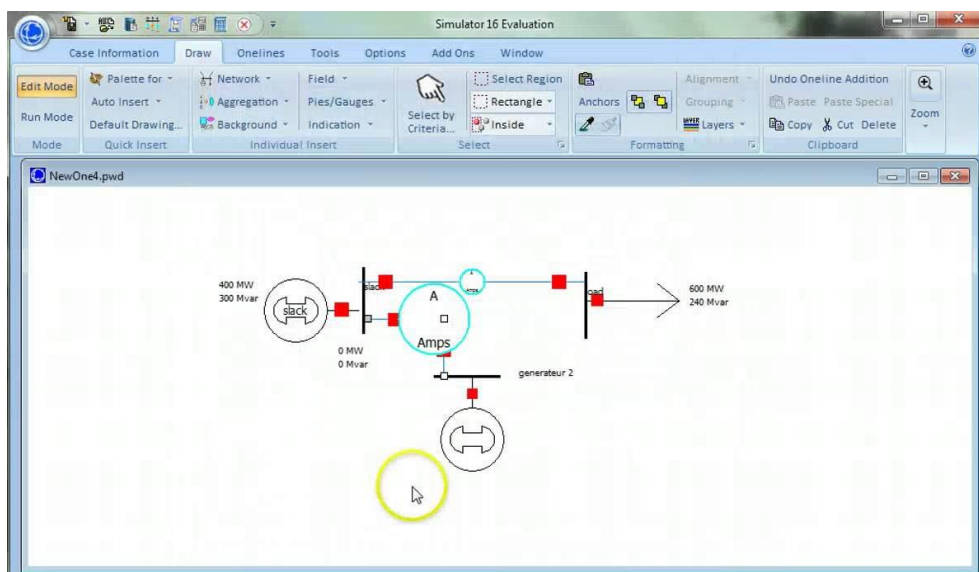


Figura 2 – Interface do *Power World* [11]

3.1.1.1 Conclusões

Através dos testes efetuados ao *PowerWorld*, pode-se concluir que é uma ferramenta bastante intuitiva que permite uma rápida aprendizagem, mesmo para os utilizadores com pouca experiência. No entanto, é necessário que os seus utilizadores detenham sólidos conhecimentos de eletrotecnia, nomeadamente em sistemas elétricos de energia, para uma utilização em pleno. Por este facto, foi um grande desafio aprender a trabalhar com esta ferramenta. A sua interface é bastante simples, talvez por ser semelhante às ferramentas *Office* da *Microsoft*, permitindo a fácil construção de redes elétricas. A simulação final, onde é possível ver de forma animada o sentido da corrente e os valores dos barramentos e linhas são atualizados, é bastante interessante uma vez que todos os dados relativos aos barramentos e às linhas são facilmente interpretadas pelo utilizador.

3.1.2 CYMFLOW

CYME internacional é um fornecedor de soluções relacionadas com Engenharia de Sistemas de Energia com uma excelente reputação mundial. As suas soluções apoiam milhares de projetos em mais de 100 países. O CYMFLOW é o módulo principal da CYME *software* para análise de redes elétricas. Este módulo permite analisar redes com milhares de barramentos e ramos, apresenta níveis de voltagem do sistema, entre outras funcionalidades [12].

A forma como a aplicação avisa se existem restrições está representada na Figura 3.

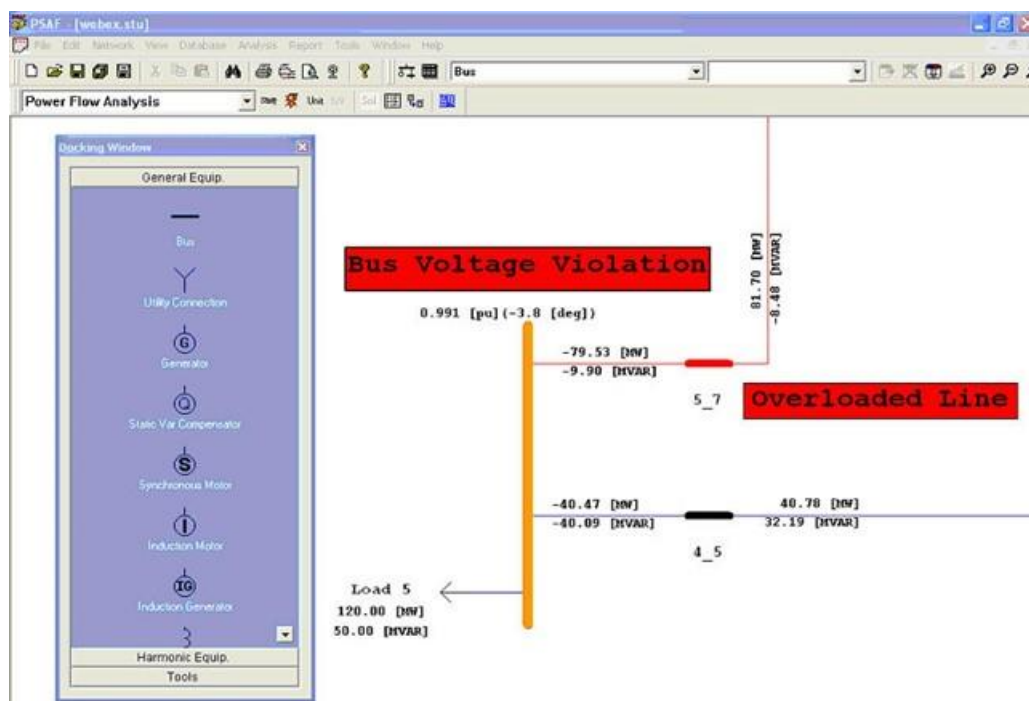


Figura 3 – CYMFLOW [12]

3.1.2.1 Conclusões

CYME *software* é muito poderoso, no entanto, menos intuitivo que o *PowerWorld*, principalmente quando o utilizador não é especialista nesta área. Para além disso, torna-se mais difícil aprender a utilizar esta aplicação uma vez que os tutoriais são de difícil acesso na Internet, ao contrário do *PowerWorld*. A simulação, em si, é interessante pois todos os dados relativos a linhas e barramentos estão visíveis para o utilizador, no entanto, a sua interface de simulação é menos apelativa que a do *PowerWorld*.

3.2 Simuladores de Mercado de Eletricidade

A maioria dos simuladores de mercados são sistemas multi-agente, pois são particularmente eficazes em analisar sistemas dinâmicos, com interações complexas entre os seus constituintes. Nos Sistemas Multi-Agente a atenção centra-se no modo de coordenação dos comportamentos inteligentes de uma comunidade de agentes de modo a partilhar conhecimento, objetivos, capacidades e planos para que se tomem ações ou se resolvam problemas. Os agentes dispõem de uma certa autonomia na tomada de decisões, graças às técnicas de inteligência artificial e estão inseridos num ambiente com o qual necessitam de interagir, pelo que devem possuir uma representação, ainda que parcial, deste ambiente e meios de perceção e comunicação, a fim de alcançar os seus objetivos.

Devido à evolução da indústria de energia, o seu estudo passou a ser bastante pertinente para conseguir antever o comportamento dos intervenientes e do próprio mercado. Contudo, começou a ser bastante complexo e por isso requer ferramentas que sejam capazes de incorporar o comportamento humano nos mercados de energia elétrica e analisar as regras do mercado.

Como descrito anteriormente, estes simuladores são bastante úteis para o estudo mais real dos intervenientes no mercado da energia elétrica. A geração de redes elétricas e posterior simulação de mercado permite um estudo ainda mais abrangente sobre o sector elétrico com o grande objetivo de validar o cumprimento das restrições técnicas da rede e da simulação do mercado.

3.2.1 MASCEM

O MASCEM [13] [14] é uma ferramenta de simulação multi-agente de mercados de eletricidade, cuja primeira versão data de 2003, desenvolvida no GECAD e que permite a simulação de diferentes mecanismos de mercado. O simulador é baseado num modelo multi-agente, desenvolvido em Java, onde a comunicação entre os agentes foi feita, na versão inicial através da plataforma de comunicações *Open Agent Architecture* (OAA), e na versão atual em *Java Agent Development Framework* (JADE).

Esta ferramenta foi desenvolvida com o objetivo de estudar os mercados de eletricidade. Inclui uma infraestrutura de simulação complexa que aborda os mais variados mecanismos de

negociação e vários agentes que competem e cooperam entre si. O simulador utiliza a teoria de jogos, técnicas de aprendizagem, análise de cenários e técnicas de otimização para apoiar os agentes do mercado nas suas decisões. Os agentes presentes no MASCEM representam várias entidades do mercado elétrico, tais como: Produtores, Compradores, Negociadores, o Operador de Mercado e o Operador de Sistema, ou seja, entidades que existem no mercado real. As características mais importantes do MASCEM estão presentes na Figura 4.

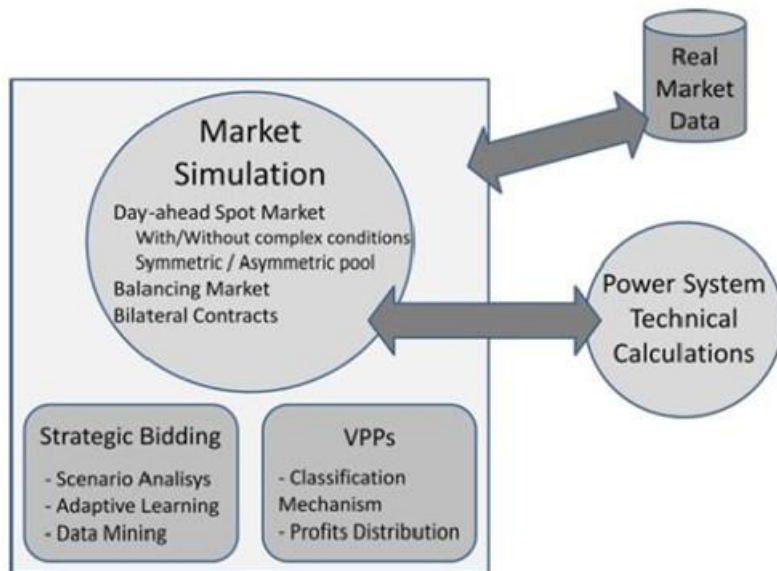


Figura 4 - Principais características do MASCEM [14]

Devido à sua estrutura e flexibilidade, o utilizador do MASCEM pode definir os cenários que pretende simular: os mecanismos de negociação a estudar, a duração de cada período (trinta minutos ou uma hora), o tipo de mercado a simular, o número de agentes, a estratégia e tipo de cada agente.

Os agentes podem estabelecer as suas próprias regras de decisão e objetivos e adaptar as suas estratégias no decorrer da simulação, baseando-se no sucesso ou fracasso das decisões anteriores. Estes agentes têm estratégias de licitação, que devem ser adequadas e atualizadas para que seja possível atingir a maior vantagem possível de cada contexto de mercado.

Os agentes do tipo *Virtual Power Player* (VPP) representam um conjunto de produtores e consumidores, maioritariamente baseados em energias renováveis [15]. São implementados como uma coligação de agentes, cada um agindo como um sistema multi-agente independente. São responsáveis por gerir a coligação entre produtores o que inclui negociar no mercado em nome da coligação e negociar internamente com os seus membros.

Para facilitar a análise por parte do utilizador são gerados, aquando da simulação, diversos gráficos e ficheiros de configuração com os resultados que vão sendo obtidos pelos diversos agentes, como pode ser comprovado pela Figura 5.

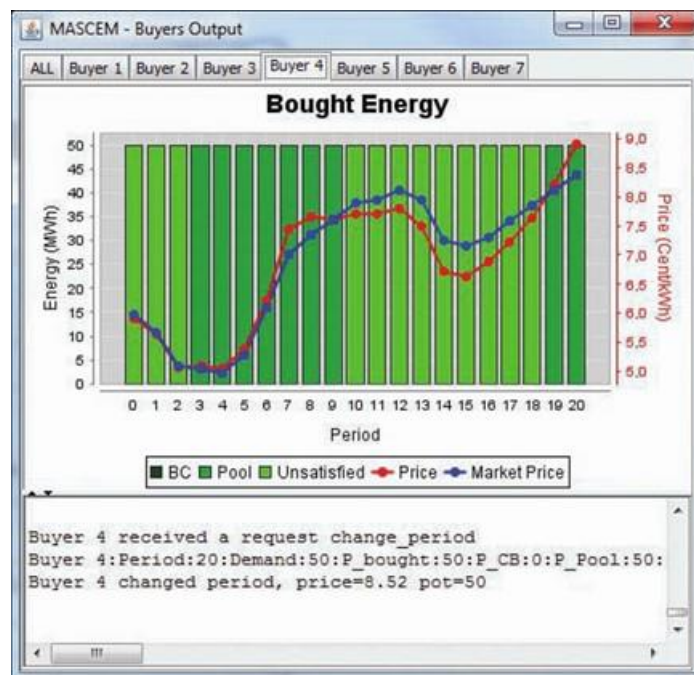


Figura 5 – Gráfico de energia comprada [15]

Na Figura 5 está representada a interface do MASCEM com um vendedor, onde é possível ver as suas propostas de energia vendida e não vendida, e as propostas que está a receber. O gráfico representa os resultados das propostas do agente, no mercado em bolsa e através de contratos bilaterais, que incluem a quantidade de energia que comprou em cada período e compara o preço das suas propostas com o preço de mercado. Na parte inferior da imagem podemos ver as propostas que o agente está a receber e informação sobre as suas ações. Neste caso, na primeira linha vemos que o período 20 acabou e o agente está a preparar-se para as negociações do período 21. A segunda linha mostra um resumo do percurso do agente no período passado. A terceira linha mostra a quantidade de energia e o preço a que o agente vai negociar no período que vai começar. [15]

Desta forma, o MASCEM contribui com uma parcela de conhecimento que possibilita um grande avanço científico nas áreas em estudo, nomeadamente na definição de protocolos e estratégias de negociação entre agentes, no apoio à tomada de decisão e na simulação e análise de mercados elétricos competitivos.

3.2.2 PowerWeb

PowerWeb é um simulador desenhado pela Universidade de Cornell para testar e analisar os diferentes tipos de mercados de eletricidade.

É uma aplicação *web*, o que facilita a sua utilização em ambientes distintos [16]. Permite que um participante obtenha acesso de qualquer ponto do globo, desde que tenha acesso à internet e a um *web browser* recente. O *browser* recomendado é o *Netscape Navigator*.

PowerWeb pretende ser um simulador flexível, para acomodar mercados de energia elétrica. Existe um agente central que atua como Operador de Sistema para assegurar que as operações são viáveis [16]. Disponibiliza leilões de venda onde os vendedores de energia podem licitar a energia da única unidade de produção que podem deter. Esta licitação ocorre de duas formas: explicitando o preço e quantidade dos blocos de licitação até perfazer o máximo de produção da unidade ou escolhendo uma das seis estratégias disponíveis para definição das licitações.

Este simulador está implementado em Perl, MATLAB, Java, JavaScript, SQL e HTML.

3.2.3 AMES

Agent-based Modeling of Electricity Systems (AMES) foi o primeiro simulador não-comercial a ser desenvolvido. A ideia do AMES não é ser mais um simulador de mercado de energia, mas sim usar os princípios estabelecidos em simuladores anteriores e otimizar as suas operações. Foi desenhado para o estudo sistemático de mercados de energia para melhorar a investigação e ensino sobre o tema. É uma ferramenta *open source* e modular, o que permite facilmente a sua modificação. Foi desenvolvido com o intuito de unificar investigadores, participantes do mercado estratégico e reguladores de mercado para que seja mais facilmente desenvolvido um modelo de mercado para pesquisa, ensino e testes [17].

É um simulador de mercados de pequena e média dimensão e, ao contrário do *PowerWeb* não possui o conceito de leilão, disponibilizando apenas os algoritmos que podem ser usados nas suas simulações para posterior seleção. Além de tudo isto, é um simulador que tem em conta o congestionamento das linhas na sua simulação [17].

3.2.4 EMCAS

O simulador EMCAS (*Electricity Market Complex Adaptive System*), desenvolvido pelo *Argonne National Laboratory* (ANL), é um simulador multi-agente, implementado em Java. Neste simulador os seus agentes podem estabelecer os seus próprios objetivos e regras de decisão, ao contrário de vários outros simuladores. Os agentes aprendem com as suas “experiências” anteriores e podem modificar o seu comportamento futuro. Isto é, ao longo da simulação os agentes podem adaptar as suas estratégias com base no sucesso ou insucesso das decisões anteriores. Isto é possível através de algoritmos genéticos, que fornecem uma capacidade de aprendizagem aos agentes. Este simulador permite testar estruturas reguladoras antes de serem aplicadas a sistemas reais [18].

Este simulador é utilizado pela REN para analisar o Mercado Ibérico, tendo sido desenvolvido um projeto, com a parceria da EDP e da Direcção-Geral de Energia e Geologia para integrar a ferramenta VALORAGUA da EDP no EMCAS [19].

3.2.5 TEMMAS

O simulador *The Electricity Market Multi-Agent Simulator* (TEMMAS) desenvolvido pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa é um simulador multi-agente com aprendizagem. Este simulador pretende ser o mais aproximado da realidade possível para um estudo mais eficiente e para uma análise de cenários o mais alargada possível. O seu objetivo consiste em ajudar a entender os complexos comportamentos do sistema que emergem da interação entre os agentes de mercado. O simulador possui um mercado artificial com a opção de ter múltiplos operadores de uma empresa, todos eles com distintas unidades de energia e ainda um operador de mercado diário que calcula o preço de mercado por hora. A simulação explora a relação entre a capacidade de produção e a procura de estratégias de licitação competitivas [20].

Foi construída uma entidade que representa o Mercado Ibérico (MIBEL) que segue a estrutura organizacional do mercado e onde cada agente atua conforme o papel desempenhado no mercado (comprador ou vendedor). Na Figura 6, pode ser vista a arquitetura do TEMMAS.

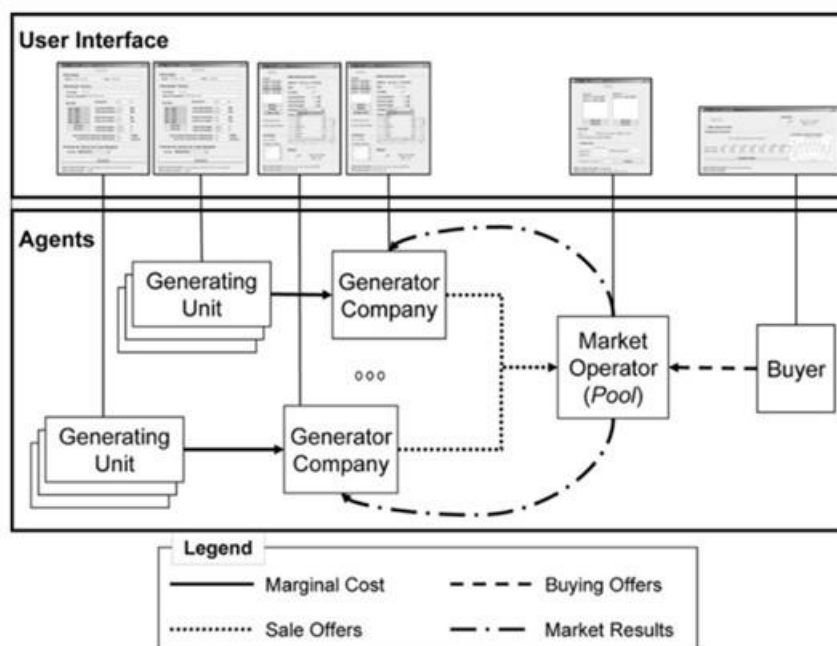


Figura 6 - Arquitetura do TEMMAS [20]

A *user interface* representada no topo da imagem é onde são configurados os agentes e os seus parâmetros. Cada agente toma as suas decisões baseadas em informações locais (conhecimento parcial) sobre outros agentes e sobre o sistema. Durante a simulação cada agente aprende e adapta as suas estratégias de acordo com o necessário.

A arquitetura do TEMMAS seguiu a metodologias INGENIAS. INGENIAS utiliza um modelo de abordagem centrada no uso de INGENME: usado para produzir um editor visual para sistemas multi-agente. [20]

3.3 Análise de Valor

Para cada novo projeto é necessário analisar o seu valor para se perceber quem irá beneficiar dele, quais serão os custos, benefícios, sacrifícios e potenciais clientes. Neste sub-capítulo, será feita a análise de valor a este projeto, tendo em conta a proposta de valor, benefícios e sacrifícios, modelo de Canvas, cenários de negócio e quantificação de valor.

3.3.1 Proposta de Valor

A proposta de valor, segundo Osterwalder [21] é “uma visão global de um conjunto de produtos e serviços de uma empresa que são de valor para o cliente”. Uma proposta de valor é uma descrição sobre o valor da empresa/produto/serviço e é necessária para determinar o modelo de negócio. A proposta de valor serve, também, para se saber como é que se fará dinheiro com o negócio e que parceiros serão precisos. Serve, também, para convencer o consumidor a comprar aquele produto ou a usar aquele serviço, fazendo com que o cliente atribua um valor, o valor percebido.

Valor percebido é o valor atribuído pelo cliente a dado serviço ou produto, tendo em conta os seus benefícios e custos (também percebidos pelo cliente), que pode variar entre clientes. Segundo Zeithmal [22] “valor percebido é a avaliação do cliente sobre a utilidade do produto, baseado na sua percepção do que tem de dar e do que vai receber”.

A proposta de valor deve conter as respostas para as perguntas, com elementos chave, tais como: “Qual é o produto?”, “Quem é o cliente?” “Que valor fornece?”, “Porque é que é um produto/serviço único?” [21]. Deve, portanto, ser simples, concisa e explícita sobre o valor do produto e os benefícios para o cliente, para que este consiga compreender facilmente as vantagens de utilizar aquele produto ou serviço. A criação de uma proposta de valor deve ser um processo de reflexão, onde se respondem a muitas questões e em que se avalia a ideia, as premissas dos clientes e resultados de mercado e de possíveis ideias semelhantes. [22]

3.3.2 Benefícios e Sacrifícios para o Cliente

Este projeto baseia-se na criação de uma aplicação de apoio num ambiente integrado de análise e simulação, ao fazer ligação entre algoritmos de restrições técnicas, simulador de mercado e criação de redes elétricas com geo-localização e redes virtuais. Até agora, isto é algo que não pode ser feito numa só aplicação e de uma só vez, sendo necessário usar várias aplicações para esse fim.

A utilização desta aplicação é ideal para entidades participantes em mercados de energia elétrica, responsáveis pela gestão de redes elétricas e investigadores de sistemas elétricos de energia e de mercados de energia elétrica. O grande benefício é o facto de tudo o que é necessário para o estudo de vários cenários de compra e venda de energia e de restrições técnicas de redes elétricas estar concentrado num só sítio e permitir uma abordagem mais abrangente. Além disso, pode funcionar só como uma forma de criar redes, se assim for o desejo

do utilizador. Para os clientes que necessitem de estudar estes cenários, é uma mais valia trabalhar com esta aplicação sendo o sacrifício o seu eventual custo.

Numa perspetiva longitudinal de valor é necessário ter sempre presentes os benefícios e sacrifícios do cliente em todas as fases do processo (antes, durante a compra e depois da compra). Antes da compra deste produto, os clientes necessitam de utilizar, pelo menos, duas aplicações para poderem criar redes elétricas e usarem simuladores de Mercados elétricos baseados nessa rede. Durante a compra o cliente tem acesso ao produto onde pode fazer tudo numa só aplicação. No entanto poderá ser necessário algum tempo para estudo de todas as funcionalidades do produto. Após a compra, o cliente terá uma só aplicação para criar redes e simular mercados de energia elétrica. Depois de usar a aplicação, o cliente já consegue perceber as suas vantagens e, eventualmente, poderá substituir na totalidade as aplicações que usava anteriormente.

3.3.3 Cenários de Negócio

A negociação está presente em todos os aspetos da vida. Segundo Bellucci and Zeleznikow [23] negociação é “um processo através do qual duas ou mais partes comunicam o seu ponto de vista para resolver diferenças entre elas”. Cada parte tem interesses individuais havendo, no entanto, alguma dependência entre eles. Existem dois tipos de negociação:

Negociação Distributiva: é, geralmente, usada na compra/venda de serviços e produtos, com pouca flexibilidade de venda e onde a relação cliente/vendedor não é algo importante. É conhecido como o tipo de negociação *win-lose*, ou seja, apenas ganha uma das partes.

Negociação Integrativa: é usada para que todas as partes atinjam o máximo de benefícios possível, baseado nos interesses de todas as partes. É o tipo de negociação *win-win*, onde a relação entre as partes é importantes e é importante que todos ganhem algo.

Para este produto, o cenário de negócio ideal será o de *win-win*, para que ambas as partes ganhem. Será, no entanto, necessário definir valores (máximo e mínimo que se pretende receber) e estar preparado para argumentar e conseguir a melhor oferta para ambos.

3.3.4 Modelo de Negócio de Canvas

O Modelo de Negócio de Canvas é uma ferramenta de empreendedorismo e gestão, muito útil na hora de criação de um produto ou serviço. Permite ter uma ideia abrangente sobre quem é o cliente, parceiros chave, qual é a proposta de valor do produto ou serviço, entre outras informações igualmente úteis. Na Figura 7 é apresentado este modelo, relativo a este projeto, onde estão descritos os clientes, parceiros, formas de venda, proposta de valor do produto, custos, entre outros.

Key Partners <ul style="list-style-type: none">• Fornecedores de <i>Software</i>• Empresas de Consultoria• Fornecedores de serviços para entidades de Sistemas Elétricos	Key Activities <ul style="list-style-type: none">• Desenvolvimento de <i>software</i>• Interfaces user-friendly• Investigação de diversas áreas	Value Proposition <ul style="list-style-type: none">• Ambiente integrado de análise e simulação, ao fazer ligação entre algoritmos de restrições técnicas, simulador de mercado e criação de redes elétricas, o que permite o uso de uma só aplicação em vez de várias• Criação de redes elétricas com geo-localização e virtuais• Flexibilidade na análise de cenários• Usabilidade	Customer Relationships <ul style="list-style-type: none">• Automatização através de serviços <i>on-line</i>	Customer Segments <ul style="list-style-type: none">• Entidades participantes em mercados de energia elétrica• Entidades responsáveis pela gestão técnica de redes (TSO, DSO e, no âmbito das redes inteligentes, os operadores de <i>smart grids</i> e de <i>microgrids</i>)• Investigadores de sistemas elétricos de energia• Investigadores de mercados de energia elétricas
	Key Resources <ul style="list-style-type: none">• <i>Hardware</i>• <i>Software</i>• Investigadores• Programadores		Channels <ul style="list-style-type: none">• Internet• Publicações científicas em conferências e revistas• <i>Workshops</i> Técnicas com comunidades académicas e industriais	
Cost Structure <ul style="list-style-type: none">• <i>Software</i> / IDEs• Investigação• Desenvolvimento• Colaboradores			Revenue Streams <ul style="list-style-type: none">• Publicidade• Aplicação	

Figura 7 – Modelo de Negócio de Canvas

3.3.5 Analisar, modelar e quantificar a criação de valor

A quantificação de valor pode ser feita através do Modelo Conceptual. O Modelo Conceptual é um conjunto de aspetos que permite, no fim, chegar a uma conclusão sobre o valor para o cliente sobre a empresa/produto/serviço.

Os aspetos a considerar são, entre outros, a rede de valor e os entregáveis tangíveis e intangíveis e o uso de um método de quantificação de valor. A análise de valor é feita através da criação de uma rede de valor. Uma rede de valor caracteriza as atividades de uma organização que criam valor e vantagem competitiva. Ou seja, é um conjunto de atividades que uma organização realiza para criar valor para os seus clientes. A maneira como as atividades dessa cadeia são realizadas determina os custos e afeta os lucros.

Para quantificar a criação de valor existem vários métodos, tais como:

- Teoria dos jogos
- Apoio Multicritério – *Multi criteria decision analysis*
- AHP (*Analytic hierarchy process*)
- MACBETH (*Measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique*)

A Teoria de Jogos é muito útil no apoio à decisão, porque ajuda a analisar o problema de uma forma mais racional. É usada desde economia, política, ciência, comportamento animal e até no *poker*.

Métodos de apoio multicritério recorrem a técnicas de comparação e cálculos para decidir entre várias opções.

O AHP é um método multicritério e é usado para decisões muito complexas e extensas, para um problema estruturado. É um método matemático com 3 fases: definir o problema, o que inclui a sua estruturação em diagrama, comparar as alternativas e definir o peso de cada critério e finalmente calcular com o auxílio a matrizes, qual a decisão mais vantajosa.

O MACBETH é usado para modelos de apoio à decisão em que as condições são incertas ou existem vários objetivos. Usa um protocolo de perguntas e respostas que necessita de duas opiniões em cada questão.

4 Ferramentas e Tecnologias

Neste capítulo são descritas as APIs estudadas e a escolhida para utilizar na aplicação. Serão também descritas as tecnologias que foram usadas na elaboração da aplicação.

4.1 Application Programming Interface

Uma *Application Programming Interface* (API) é uma especificação usada por componentes de *software* para comunicar entre eles. Nesta aplicação será necessário recorrer a uma API de pesquisa e visualização de mapas terrestres, bem como geocodificação¹ que podem ser usadas para colocar marcadores ou posicionar o mapa.

4.1.1 HERE

A Nokia lançou uma plataforma para mapas, robusta, rápida e funcional. A HERE é usada por várias empresas, *websites* e aplicações, entre eles, o *website* Yahoo! Maps, a CNN, e o Bing. Promete ser completa e funcional, no entanto é uma API paga [26]. Estão disponíveis 3 APIs: Javascript, REST e Mobile [27].

A API de **JavaScript** é um conjunto de interfaces de programação que permitem criar aplicações *web*. Existem vários componentes que podem ser usados: mapas, geocodificação, componente de direção, permite gerar caminhos através de sensores em áreas metropolitanas tendo em conta o trânsito, e o componente de lugares, que permite implementar pesquisas que devolvem tudo sobre um dado lugar (nome, contacto, reviews...).

¹ Processo de conversão de endereços (por exemplo, "ISEP, Rua de São Tomé, Porto") em coordenadas geográficas (por exemplo, latitude 41.177875 e longitude -8.608013),

A API **REST** permite obter uma imagem estática da região do mapa requerida pelo utilizador. Providencia uma forma rápida e flexível de aceder a uma grande variedade de mapas e funcionalidades. Tem uma API de *routing*, para criar direções entre lugares, APIs de trânsito, de lugares e de tempo, que permite dar informações relativas ao estado do tempo enquanto o utilizador utiliza o mapa.

A API **Mobile** é usada para a criação de aplicações móveis que contém todas as outras APIs referidas anteriormente: Mapa, geocodificação, direções, lugares, trânsito e ainda utiliza realidade aumentada para que o utilizador consiga ver em tempo real como está um determinado sítio.

No *website* dos mapas HERE é fácil procurar locais numa dada localidade (Figura 8). A plataforma mostra de imediato o estado do tempo e a temperatura do sítio, bem como os locais mais visitados, com pontuações de utilizadores e identifica-os no mapa.

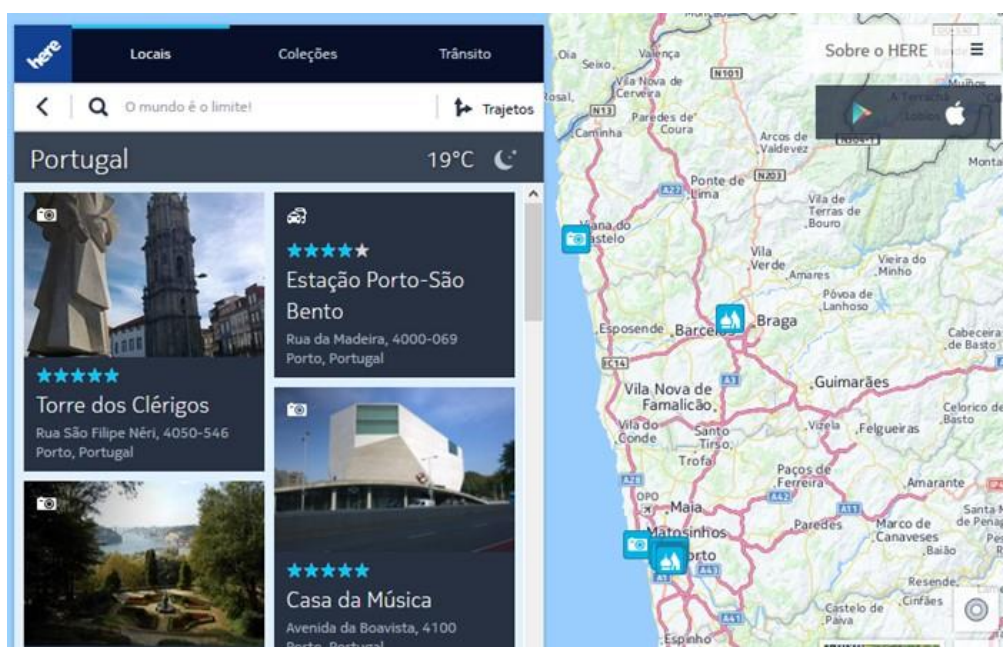


Figura 8 – Interface HERE [26]

Tem uma interface muito simples e fácil de utilizar, com todas as funcionalidades à vista do utilizador, o que permite um melhor uso da mesma. Através da barra negra conseguimos procurar locais, criar coleções de lugares e no separador de trânsito ver como estão as estradas em tempo real. Clicando em “Trajetos” é facilmente definida uma rota. Todas estas definições estão disponíveis aos programadores, uma vez que a HERE tem APIs separadas para locais, trânsito, etc.

A HERE permite visualizar grandes áreas metropolitanas em 3D (Figura 9). O tempo de carregamento de uma cidade em 3D é bastante rápido e com boa qualidade, o que tem sido um ponto bastante importante e positivo quando se fala dos mapas HERE. Esta API permite a

edição do mapa, no entanto essa funcionalidade está restrita a utilizadores autenticados e apenas a alguns países. As mudanças no mapa têm de ser verificadas pela Nokia [27].

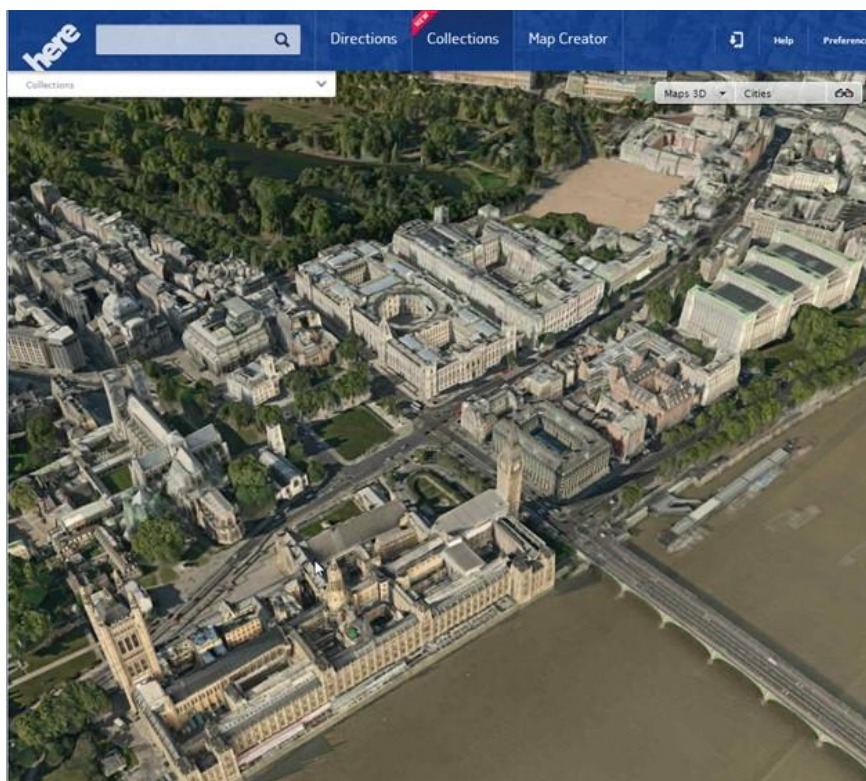


Figura 9 – Mapa 3D [28]

4.1.2 OpenStreetMap e JMAPViewer

OpenStreetMap (OSM) é um projeto da *OSM Foundation*, inspirado por *websites* como a Wikipédia, com o objetivo de criar um mapa-mundo livre e editável [29]. Os mapas iniciais foram criados através de dispositivos GPS portáteis, usados por voluntários que andavam pelas ruas para registar os dados que eram posteriormente inseridos numa base de dados. A partir daí os mapas foram criados usando dados de recetores GPS, fotografias aéreas e outras fontes como por exemplo, os mapas da *Yahoo!*. Algumas agências governamentais têm oferecido os seus dados sob licenças, como por exemplo, os dados do satélite *Landsat 7*, satélite norte-americano cuja missão era obter o maior registo da terra existente no planeta [30] e o *Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing* (TIGER) que é um formato usado pelos Estados Unidos para descrever os atributos da terra tais como ruas, edifícios, rios e lagos. O *website* permite o registo de utilizadores que podem carregar os históricos do GPS e editar os dados usando as ferramentas disponíveis.

JMAP Viewer [31] é um componente Java que permite com muita facilidade a integração de um mapa *OpenStreetMap* numa aplicação Java. Este componente possui controlos de *zoom*, a possibilidade de o utilizador escolher entre diversos mapas, entre outras funcionalidades. Na

Figura 10 é possível visualizar a interface do *JMAPViewer* com todas as funcionalidades visíveis na parte superior da janela.

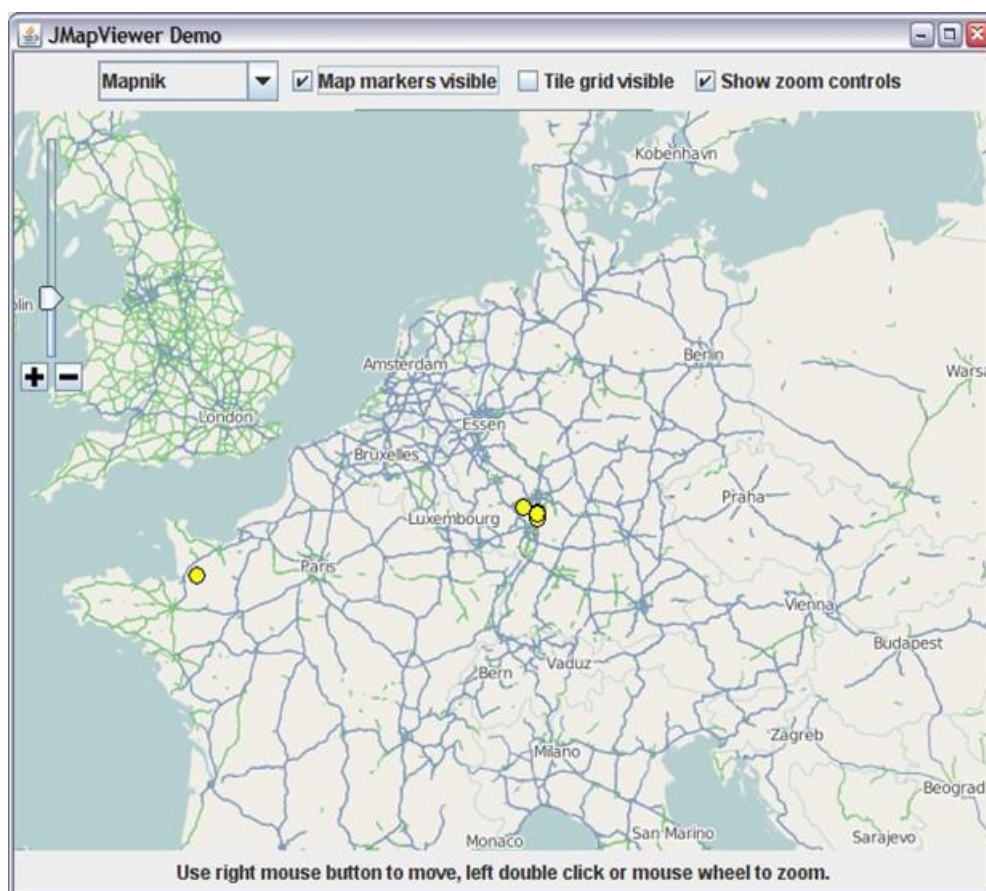


Figura 10 – Interface *JMAPViewer*

No entanto, este componente tem um problema bloqueante: existe pouca documentação sobre ele. Após longos dias de testes e tentativas de uso, concluiu-se que é extremamente difícil trabalhar com ele, pois não existem tutoriais nem documentação que expliquem como usá-lo.

4.1.3 GMap.NET

Great Maps API, ou *GMap.Net*, é um controlo .NET *open source* [32]. É um controlo muito poderoso uma vez que permite utilizar vários mapas (*Google, Yahoo!, Bing, OpenStreetMap...*) ficando a seleção do mapa à escolha do utilizador ou programador. É algo recente e em constante evolução, mas já bastante desenvolvido para ser utilizado sem dificuldades. É muito utilizado, o que faz com que facilmente se encontre documentação na internet. Disponibilizam no seu *website* uma aplicação de demonstração que pode ser transferida, o que faz com que a sua aprendizagem seja muito rápida. A interface da demonstração pode ser vista na Figura 11.

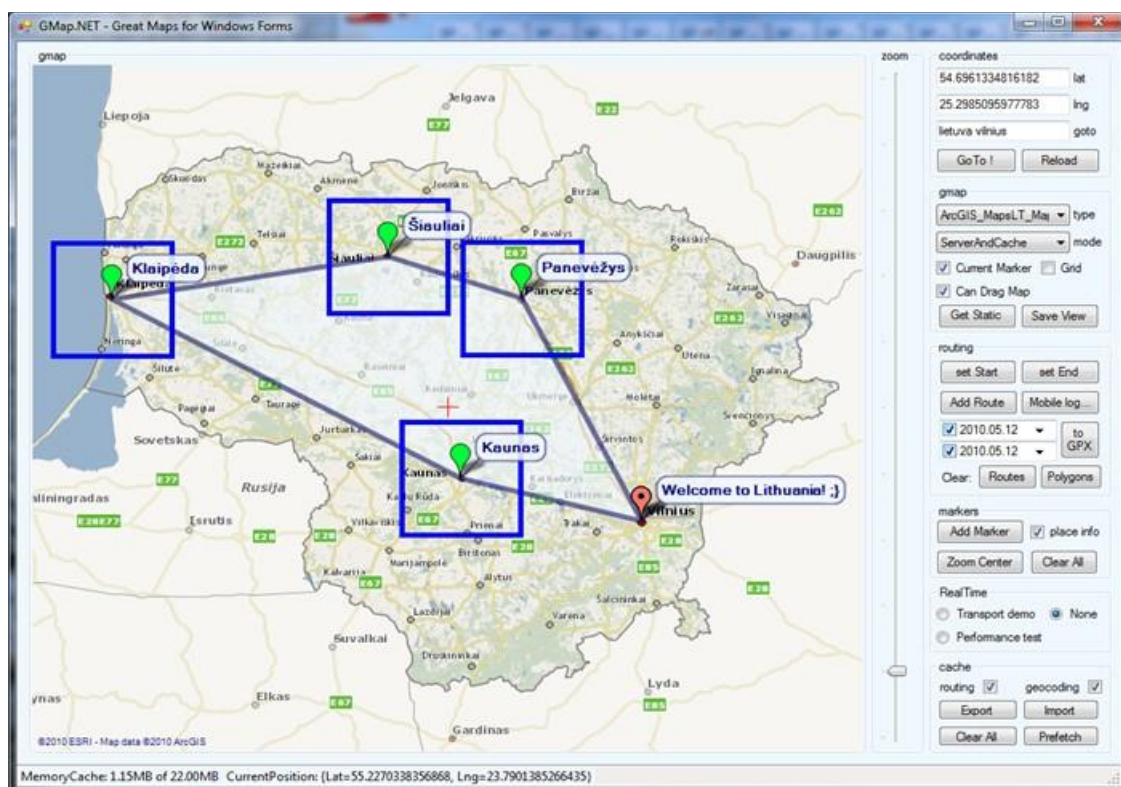


Figura 11 – Interface da demonstração de GMAP.NET

Existe uma demonstração programada em Windows Forms e outra em *Windows Presentation Foundation* (WPF). Ambas são muito poderosas, intuitivas e complexas, principalmente a que está desenvolvida em WPF.

Este controlo permite usufruir dos mapas e navegar facilmente. É possível criar marcadores e ligá-los, apagá-los e permite que o mapa seja utilizado sem ser necessária ligação à internet. No entanto, partes do mapa que nunca foram abertas nunca serão bem carregadas o que não impede que o mapa seja utilizado. Permite ainda a geração de *printscreens*.

GMap.NET está em constante evolução e com muita documentação, tutoriais e vários utilizadores experientes. Neste momento o controlo pode ser usado em *Windows Forms*, *Windows Mobile* e WPF.

4.1.4 Análise comparativa

Para este projeto são necessárias algumas funcionalidades base, existentes neste tipo de APIs. As funcionalidades são:

- Geocodificação;
- Criar pontos no mapa;
- Ligar pontos;
- Movimentar o mapa (zoom in, zoom out...).

Tendo isto em conta e de forma a perceber quais as vantagens e desvantagens de cada API, foi feita uma análise comparativa entre elas. Na tabela que se segue, estão identificados alguns dos pontos mais importantes:

Tabela 1 - Análise comparativa entre as várias APIs

	Geocodificação	Documentação	App Desktop	Gratuita
HERE	✓	✓	✓	X
JMapView	✓	X	✓	✓
GMap	✓	✓	✓	✓

Foram, então, retiradas algumas conclusões:

- Todas as APIs permitem geocodificação e edição do mapa;
- A HERE API tem todas as funcionalidades necessárias para este projeto, mas é paga;
- Verificou-se, após algum tempo de experimentação, que é bastante difícil de trabalhar com o JMapView. O facto de ser pouco usada e existir pouca informação na internet tornou-se um problema;
- GMap.NET tem várias vantagens tais como: usar vários mapas, ter muita documentação e utilizadores, estar constantemente a ser melhorada, é em .NET e por isso podem ser utilizados padrões e conhecimentos recentes. Além disso, este controlo está desenvolvido para *Windows Forms* e WPF.

4.1.5 Conclusão

Para além das APIs e controlos descritos neste capítulo, também foram estudadas as APIs da *Google* e da *Yahoo!*. Não foram descritas neste capítulo porque no decorrer da investigação foram descontinuadas. Tendo em conta a análise comparativa do sub-capítulo anterior, e as conclusões retiradas, optou-se pela utilização do controlo GMap.NET. Não é opção criar esta aplicação com tecnologias já obsoletas, e como trabalhar com JMapView se mostrou muito difícil, a escolha mais sensata incidiu sobre GMap.NET.

4.2 Tecnologias

A escolha da tecnologia recaiu sobre: *Windows Forms* e WPF. Neste sub-capítulo serão abordadas as duas tecnologias, será feita uma comparação e apresentadas as conclusões sobre qual delas foi decidido utilizar.

4.2.1 Windows Forms

Windows Forms é uma *framework* desenvolvida para criação de aplicações baseada em .NET. Fornece um grupo de classes orientado a objetos que permitem criar aplicações para *Windows*. Com *Windows Forms* é muito fácil criar aplicações com controlos já conhecidos do *Windows*, pois é muito fácil e intuitivo trabalhar com o *designer* do *Visual Studio*.

Um *form* é um componente visual no qual a informação pode ser disponibilizada ou pedida ao utilizador. As aplicações consistem num conjunto de *forms* necessários para atingir o objetivo final do projeto.

4.2.2 Windows Presentation Foundation

WPF é a uma *framework* da *Windows*, que permite a criação de aplicações com um grau de personalização extremamente elevado. É integrada na *framework* .NET 3.0 ou superior, o que permite criar aplicações em WPF numa grande variedade de versões.

Possui um conjunto de características que incluem gráficos 2D e 3D, animações, documentos, aplicação de dados multimédia, texto e tipografia numa única *framework*. A Figura 12 permite ter uma visão geral das principais funcionalidades do WPF.

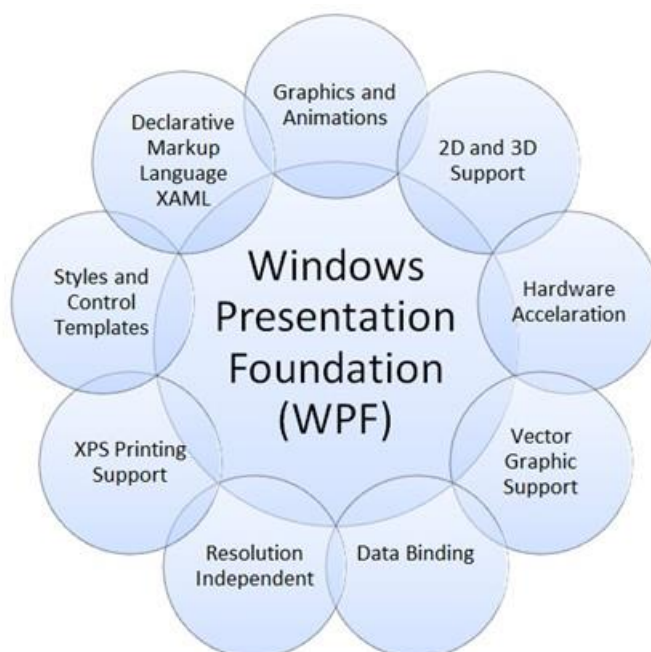


Figura 12 – Principais características do WPF [33]

O motor de *render* baseado em vetores e independente da resolução, usa aceleração de *hardware* das placas gráficas mais recentes, o que permite que a interface seja mais rápida, escalável e com resolução independente. Isto significa que as medidas em WPF são unidades lógicas (1/96 polegadas) e não pixels, o que permite que a interface acompanhe o aumento ou diminuição de resolução de ecrã. [34]

Uma das grandes vantagens de utilizar WPF é a separação entre a aparência da interface e o seu comportamento. Regra geral, a aparência da interface é criada no XAML enquanto o seu comportamento é implementado numa linguagem de programação, como por exemplo o C#.

4.2.3 XAML - Extensible Application Markup Language

Extensible Application Markup Language (XAML) é uma linguagem de marcação declarativa, baseada em *eXtensible Markup Language* (XML) aplicada ao modelo de programação .NET *Framework*, o que permite criar e inicializar objetos .NET com hierarquia de uma forma simples. Actualmente, XAML é usado para criar interfaces não só em WPF, para o qual foi inicialmente criado, mas também em *Silverlight*.

Tudo o que é feito, numa interface gráfica, através de código C# pode também ser feito em XAML, sendo esta última uma nova maneira de criar e inicializar objetos. Cabe ao programador decidir o que quer criar em XAML e o que criar em C#. No entanto, há algumas vantagens em usar XAML. No excerto de Código 1 vemos a declaração de um *StackPanel* com um *textblock* e um botão, em XAML.

```
<StackPanel>
    <TextBlock Margin="20">Hello World!</TextBlock>
    <Button Margin="10" HorizontalAlignment="Right">OK</Button>
</StackPanel>
```

Código 1 - Criação de dois elementos em XAML

De seguida, no excerto de Código 2, em C#, a mesma declaração:

```
// Create the StackPanel
StackPanel stackPanel = new StackPanel();
this.Content = stackPanel;

// Create the TextBlock
TextBlock textBlock = new TextBlock();
textBlock.Text = "Hello World";
stackPanel.Children.Add(textBlock);

// Create the Button
Button button = new Button();
button.Content = "OK";
stackPanel.Children.Add(button);
```

Código 2 - Criação de dois elementos em C#

É notório que a versão em XAML é mais pequena, ou seja, são necessárias menos linhas de código e é mais fácil de ler.

É possível concluir que o uso de interface em XAML tem algumas vantagens:

- Código mais curto e mais claro;
- Existe uma separação entre o código de desenho da interface e a lógica;
- A separação existente entre XAML e lógica da interface permite que os papéis de *designer* e programador sejam mais facilmente separados;

4.2.4 Análise comparativa: WPF vs *Windows Forms*

Ambas as tecnologias permitem criar interfaces de forma bastante intuitiva e bastante similares ao ambiente gráfico *Windows*. Enquanto *Windows Forms* usa os controlos do *Windows*, o WPF permite, mais facilmente, alterar esses controlos.

Um grande exemplo é a criação de um botão com uma imagem e texto. Como não é um controlo *standard* do *Windows*, *Windows Forms* não permite esta possibilidade sem ser necessário programar. Ou seja, o utilizador terá de, por exemplo, implementar um botão que suporte imagens. Em WPF é mais fácil fazer isto, uma vez que o botão poderá conter qualquer outro componente. Pode-se concluir que WPF é mais flexível do que *Windows Forms*, não estando restringido aos controlos do *Windows*, e permitindo mais criatividade.

Uma vantagem de *Windows Forms* são os componentes *3rd party* - componentes desenvolvidos para uma tecnologia que podem ser reutilizados. Por ser mais antigo, existem mais *3rd party* desenvolvidos para *Windows Forms*, no entanto, neste momento já não são produzidos tão frequentemente, estando as atenções voltadas para a produção de componentes *3rd party* para WPF. Na tabela que se segue, são visíveis as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

Tabela 2 - Análise comparativa de WPF e *Windows Forms*

WPF	WINFORMS
É uma tecnologia mais recente, e por isso, mais fácil de aplicar os padrões atuais	É muito mais antiga e por isso já está bastante testada e divulgada
O <i>designer</i> do Visual Studio requer alguma atenção. É necessário mais trabalho do que em WinForms	O <i>designer</i> do Visual Studio é muito fácil de utilizar sem necessidade de ajustar código
Mais fácil de desenhar novos controlos	Mais trabalhoso para desenhar novos controlos
É flexível, o que permite fazer mais coisas sem a necessidade de escrever ou comprar novos controlos	Os controlos são limitados e é necessário escrever ou comprar controlos
Mais fácil de implementar vários tipos de media (vídeos, animações 3D...)	Implementar media é mais trabalhoso do que em WPF
Utiliza aceleração de <i>hardware</i> , o que permite um melhor desempenho ao criar a interface	-
Permite criar aplicações <i>web</i> e aplicações <i>desktop</i>	Apenas permite criar aplicações <i>desktop</i>

É possível concluir que WPF tem várias vantagens:

- É uma tecnologia mais recente e é possível implementar abordagens mais recentes;
- É flexível na implementação de novos controlos;
- Melhor desempenho na criação de uma interface;
- É a maneira recomendada, actualmente, para desenvolver aplicações *desktop* pela *Microsoft*.

4.3 Conclusão

Uma interface simples, rápida e com controlos apelativos é o ideal de todas as aplicações. A tecnologia escolhida tem impacto na interface, porque deve ser uma tecnologia que permita criar interfaces intuitivas e usáveis. A pesquisa pela melhor tecnologia é uma parte importante do desenvolvimento de *software*, ou seja, deve ser escolhida a tecnologia mais apropriada ao que se pretende desenvolver. Desta forma, foi feito um estudo comparativo entre várias APIs de geocodificação e mapas, bem como uma análise a duas tecnologias de desenvolvimento de *software*. Foi escolhido utilizar a tecnologia *Great Maps*, usando WPF.

5 Análise Técnica

Este capítulo visa descrever todos os aspetos referentes à análise técnica do projeto proposto nesta dissertação. Inicialmente é abordada a metodologia de desenvolvimento adotada, os requisitos, a arquitetura da aplicação e é descrito o seu desenvolvimento.

Para a execução deste projeto, foi necessário recorrer às melhores práticas de Engenharia de *Software* tais como fazer a análise do problema usando diagramas UML para auxiliar e orientar na implementação, planejar o desenvolvimento de todo o projeto, definir a arquitetura de *software* mais adequada, a realização de testes ao longo de todo o processo de desenvolvimento, e a aplicação de Padrões de *Software* (*Design Patterns*).

5.1 Metodologia de Desenvolvimento

Ao desenvolver um sistema de *software*, é indispensável adotar uma metodologia de desenvolvimento adequada para que este seja bem-sucedido. A metodologia mais utilizada é a designada em cascata, cujo ciclo de desenvolvimento se inicia com análise do sistema e atravessa, sequencialmente, as etapas de especificação de requisitos, conceção, implementação e testes, baseando-se numa abordagem de decomposição das funcionalidades [35].

A metodologia em cascata é bastante simples de compreender e é bastante usada, no entanto para o desenvolvimento de sistemas mais complexos não é a mais indicada. Foi desenvolvida por Boehm [36] a metodologia em espiral, que aplica uma abordagem iterativa que contém quatro etapas: planeamento, análise de risco, engenharia e avaliação, que são percorridas regularmente à medida que o projeto avança.

No entanto, Hix e Hartson aperceberam-se que com estas metodologias nem todos os colaboradores envolvidos num projeto tinham uma compreensão das ligações entre as

atividades em todos os níveis. Por esse motivo propuseram uma nova metodologia de desenvolvimento, denominada metodologia em estrela, ilustrada na Figura 13.



Figura 13 - Metodologia em estrela

As etapas na metodologia em estrela, não necessitam de ser abordadas por uma ordem específica, ao contrário do que sucede na metodologia em espiral. Pode-se iniciar a fase de conceção sem que a fase do levantamento de requisitos esteja concluída e voltar a esta em qualquer altura. Contudo, antes de prosseguir para uma nova etapa, é necessário fazer uma avaliação de usabilidade da etapa anterior. Isto permite garantir que novas implementações não trazem problema para implementações mais antigas, uma vez que tudo é testado novamente. Assim, esta metodologia foca a avaliação, proporcionando mais facilmente melhorias no sistema [35].

A aplicação apresentada neste capítulo foi desenvolvida de acordo com a metodologia em estrela. Foi testada e avaliada em cada iteração, de modo a efetuar correções e melhorias.

5.2 Modelo de Domínio

Um modelo de domínio é um dos artefactos mais importantes para elaborar durante a análise do problema. Ajuda a compreender o negócio e a identificar possíveis classes concetuais através da identificação de conceitos subjacentes ao problemas. São também apresentadas as ligações entre os conceitos. Na Figura 14 é apresentado o modelo de domínio deste projeto.

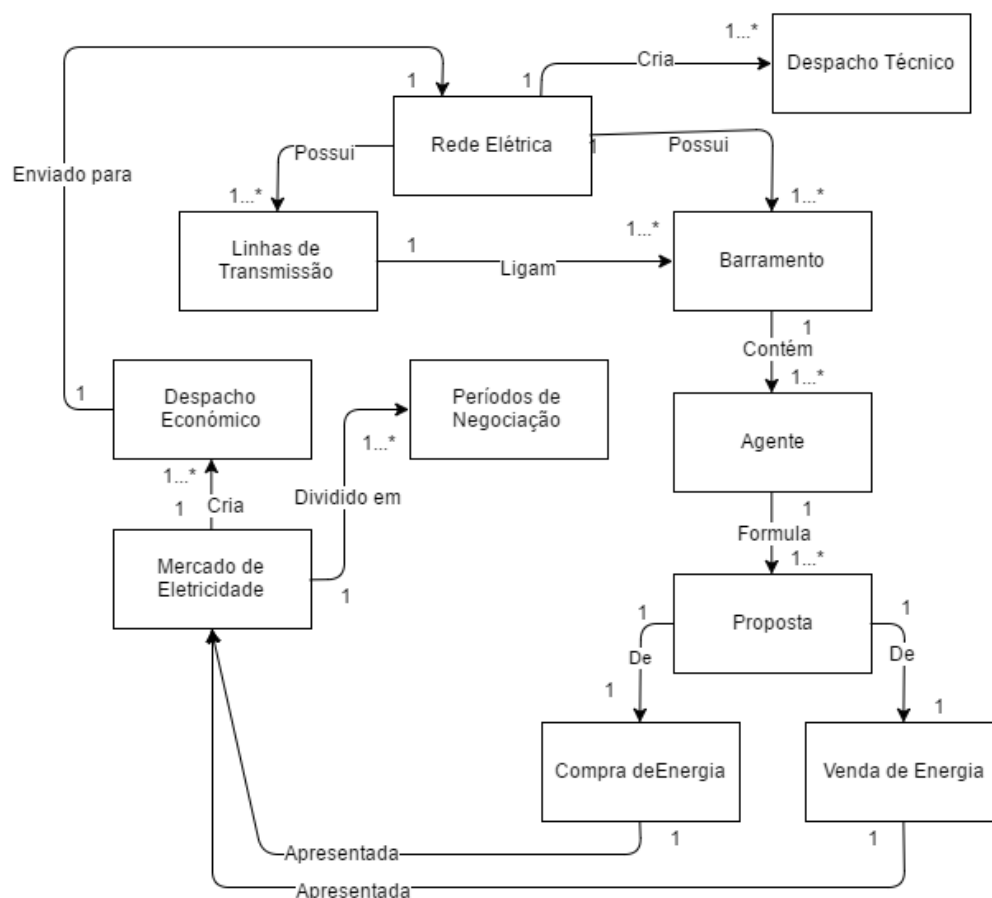


Figura 14 - Modelo de Domínio

As redes elétricas possuem barramentos e linhas de transmissão, que os ligam. Os barramentos possuem cargas e/ou geradores, representados no mercado por agentes que formulam propostas, de compra ou de venda de energia, caracterizadas pelo volume e o preço. As propostas são posteriormente apresentadas ao mercado, sendo posteriormente analisadas pelo Operador de Mercado. O Mercado está dividido em períodos de negociação e cria um Despacho Económico, que segue para a Rede Elétrica, e que será analisado pelo Operador de Sistema, criando o Despacho Técnico.

5.3 Requisitos

Nesta secção descrevem-se os principais requisitos funcionais e não funcionais da aplicação a desenvolver, sob um ponto de vista mais técnico. A informação apresentada nesta secção provém de uma análise conceptual ao problema, após adquirir conhecimentos sobre a área de negócio da aplicação, nomeadamente conceitos e as relações.

A análise de requisitos é o passo essencial na criação e desenvolvimento de qualquer projeto. É baseado nos requisitos especificados que o projeto será construído. O processo de

levantamento de requisitos exigiu, como é expectável, a participação ativa do cliente. Desta forma, os requisitos identificados são o resultado de uma interação contínua com o cliente.

5.3.1 Requisitos não funcionais

Escalabilidade: deve ser possível adicionar novos elementos;

Usabilidade: a usabilidade está relacionada com a eficácia e a eficiência da interface do utilizador e com a reação deste para com a interface. A interface gráfica de acesso ao sistema deve ser simples e intuitiva para o utilizador;

Desempenho: o processamento da rede elétrica deve ser eficiente para que o desempenho da aplicação seja o mais rápido e o melhor possível, reduzindo o número de erros despoletados;

5.3.2 Requisitos Funcionais

Identificaram-se os seguintes requisitos funcionais:

- Criação de rede elétrica num mapa ou tela (controlo *canvas*): a rede elétrica pode ser real ou “virtual”; Inclui a criação de barramentos, linhas de transmissão e agentes MASCEM. Os agentes devem ser adicionados a um barramento;
- Visualizar as características principais de cada elemento que constitui a rede;
- Alteração das características principais de cada elemento que constitui a rede;
- Remover elementos que constituem a rede;
- Importação do mapa de uma rede elétrica a partir de ficheiro *excel*;
- Exportação da rede para ficheiro *excel*;
- Interligação da aplicação com o MASCEM (Operador de Mercado) através do despacho Económico;
- Interligação com os algoritmos de *Power Flow* (Operador de Rede) através do despacho Técnico – realizando o Cálculo de Trânsito de Potência;
- Visualização de resultados de trânsito de potências e resultados de mercado.

No Diagrama de Casos de Uso representado na Figura 15, estão representadas as funcionalidades pretendidas para a aplicação.

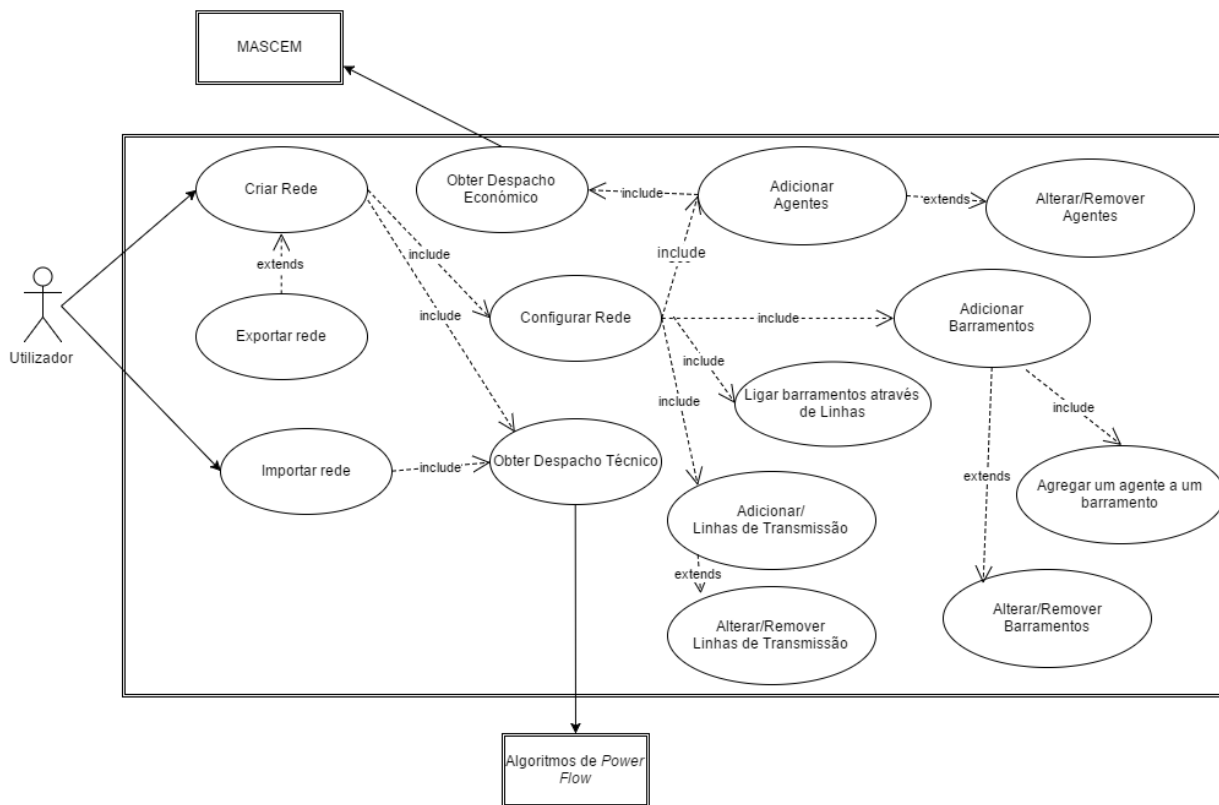


Figura 15 – Diagrama de Casos de Uso

Criar uma nova rede: A aplicação deve permitir a criação de uma rede elétrica, usufruindo de um mapa para o seu posicionamento, ou uma rede sem mapa real. Este requisito está ligado à **configuração da rede**. Para a criação de uma rede são necessários os seus elementos constituintes como barramentos, agentes e linhas de transmissão. Cada elemento tem as suas características básicas que devem poder ser alteradas. Os elementos podem ser inseridos ou removidos.

Importar rede: a aplicação deve permitir o *upload* de um ficheiro *excel* com uma rede elétrica caracterizada, para posterior visualização na interface. Deve permitir a **configuração da rede** e alteração estrutural da rede, ou seja, adicionar, remover e alterar os elementos já existentes.

Exportação da rede: A aplicação deve permitir a geração de um documento *excel* com a rede caracterizada, que deve funcionar para posterior carregamento de rede.

Configurar a rede: A configuração da rede incluiu **adicionar, alterar ou eliminar barramentos, linhas e agentes**. Deve ser possível **associar agentes a barramentos e ligar dois barramentos através de uma linha**. Após o carregamento de um cenário do MASCEM deve ser possível obter um novo despacho Técnico através dos **algoritmos de Power Flow**, para determinar se a rede construída, naquele período definido, perfaz todos os limites impostos. Caso a rede não esteja de acordo com os limites técnicos, deve ser possível **obter um novo despacho económico**, para reiniciar a simulação.

5.4 Estrutura da Aplicação

Quando se pretende desenvolver uma aplicação informática, um dos primeiros passos e decisões a tomar é definir a sua arquitetura, pois esta depende do tipo de características do sistema, e vai influenciar toda a sua conceção.

5.4.1 Arquitetura

A arquitetura definida para esta aplicação está representada na Figura 16, através de uma arquitetura modular constituída por três camadas lógicas:

- *Graphical User Interface* representa e agrega todos os objetos gráficos desenvolvidos que visam interagir com o utilizador da aplicação;
- *Business Logic Layer* representa e agrega todos os objetos cuja função genérica se relaciona com a disponibilização e persistência de informação da aplicação;
- *Communication Layer* representa os conteúdos com os quais esta aplicação comunica. Esta é independente das outras camadas.

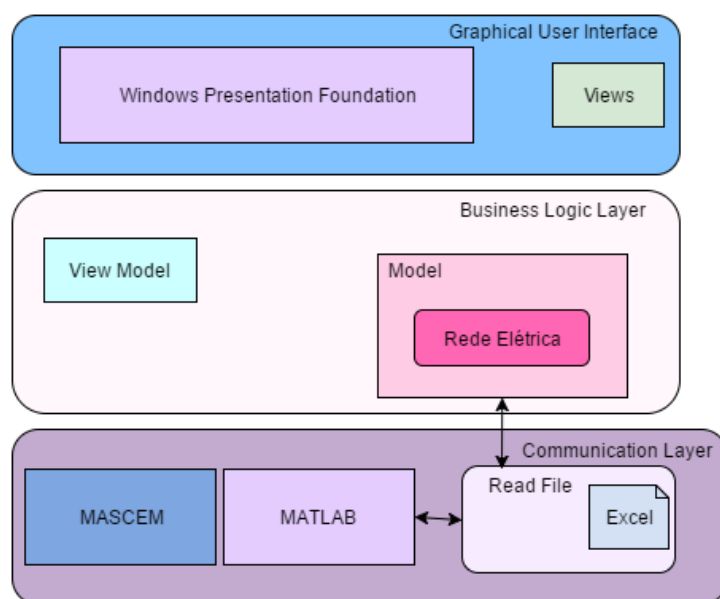


Figura 16 – Arquitetura

A primeira camada é exclusivamente composta por um módulo responsável por todo o ambiente gráfico da aplicação. É através deste módulo que o utilizador interage com aplicação. A segunda camada é composta por:

- *ViewModel* corresponde a um conjunto de classes de *software*. As classes necessárias de comunicação entre o *Model* e as *Views*, presentes na primeira camada. É o *ViewModel* que garante que todos os dados necessários para apresentar ao utilizador estão preparados, retirando essa responsabilidade da interface gráfica.

- *Model* corresponde à implementação dos conceitos de negócios e respectivas regras, que inclui as classes responsáveis pela criação da Rede Elétrica.

A terceira camada representa o simulador MASCEM e os algoritmos de *Power Flow* e, como foi desenvolvida a funcionalidade de importação e exportação de ficheiro, uma das formas de comunicação é, também, através de ficheiros *excel*.

5.4.2 Padrão MVVM

O padrão *Model-View-ViewModel* (MVVM) é um padrão arquitetural que proporciona uma separação de conceitos muito lógica e fácil de entender. Permite que a aplicação seja mais fácil de testar, manter e evoluir. Proporciona, também, oportunidades de reutilização de código. A Figura 17 mostra a interação entre camadas desta arquitetura

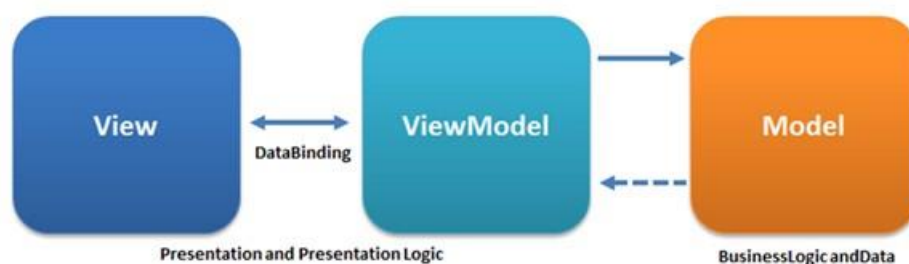


Figura 17 – Diagrama de interação entre camadas. [37]

A *View* é a interface com a qual o utilizador interage. É onde estão os controlos, as listas de informação e tudo aquilo que o utilizador usa e vê. É na *View* que se colocam os dados de forma mais apresentável e mais agradável à vista do utilizador.

Model representa os dados e ou informação com a qual a aplicação lida. Não representa os comportamentos ou serviços que servem para manipular e gerir esses dados. Lógica de negócio, regra geral, não deve estar no *Model*, mas nem sempre esta condição se verifica pois depende muito do projeto e dos dados.

O *ViewModel* é a classe que trata da interação entre o *Model* e a *View*. A função do *ViewModel* é ter, sempre, tudo preparado para que a informação esteja disponível ao alcance da *View*, e que, a partir daí, é responsável por apresentar de forma adequada a informação necessária para o utilizador.

MVVM foi o padrão arquitetural escolhido pelas inúmeras vantagens apontadas e dado ser indicada para interfaces sólidas e importantes, tal como é a interface desta aplicação, principalmente por potenciar o seu desempenho graças ao *ViewModel*.

6 Implementação

Neste capítulo é descrita a sequência de interação desta aplicação com o MASCEM e os algoritmos de *Power Flow*. É feita uma abordagem à interface mostrando como se chegou à interface ideal e é descrita a solução, abordando a criação dos principais elementos da rede e a utilização da API GMap.Net.

6.1 Sequência de interação

Ainda que a aplicação descrita neste documento possa ser utilizada individualmente, com o recurso aos ficheiros *excel* que contêm os dados necessários, o objectivo é que a aplicação incorpore um ambiente de simulação.

Por isso, a aplicação é a ligação entre o simulador de mercados eléctricos, MASCEM, e os algoritmos de verificação de restrições técnicas da rede. Esta sequência oferece a possibilidade de verificar automaticamente, se para cada simulação de mercado (transacção de energia entre compra e venda), e dada a rede na qual cada agente integrante do mercado está posicionado, as transacções efetuadas são válidas.

Na Figura 18 é descrito o processo de interação entre as várias ferramentas.

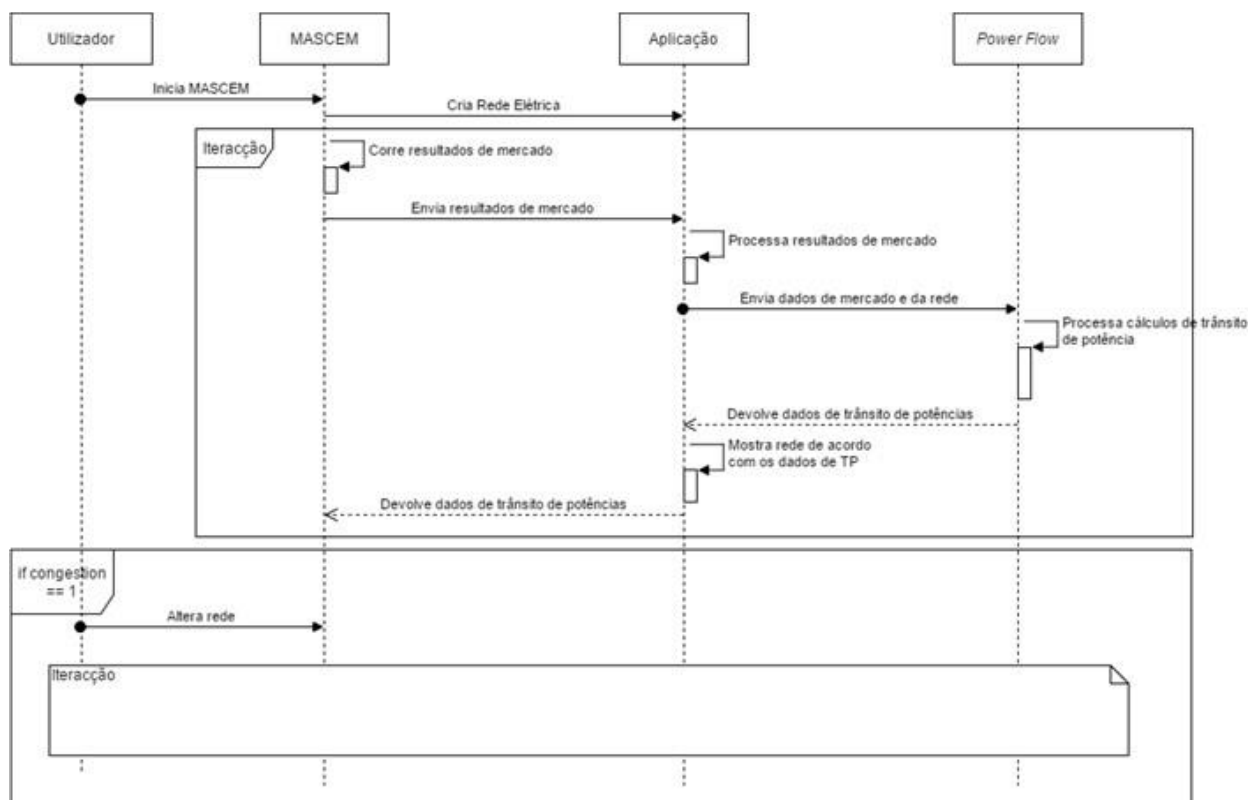


Figura 18 – Sequência de interação

A sequência, como descrita no diagrama representado na Figura 18, começa com o MASCEM a iniciar a aplicação descrita neste documento e a criar a rede elétrica. De seguida, inicia a simulação para obter dos resultados de mercado que são enviados para esta aplicação. A aplicação processa os dados recebidos e liga-se aos algoritmos de *Power Flow* para obter os dados sobre as restrições técnicas da rede – os resultados do cálculo de trânsito de potências. Os algoritmos de *Power Flow* estão desenvolvidos em MATrix LABoratory (MATLAB). A aplicação recebe esses dados e mostra a rede ao utilizador, de acordo com os dados recebidos, que são enviados, também, para o MASCEM. Caso existam problemas técnicos na rede, toda esta sequência pode ser refeita, até encontrar um ideal de simulação.

6.2 Interface

A interface de uma aplicação é muito importante, pois é a única forma que o utilizador tem para interagir com o sistema. Ou seja, para o utilizador a interface é o Sistema. Como disse Tom Carey em 1989 *“If your computer were a person, how long ‘til you punch it in the nose?”* – Se o seu computador fosse uma pessoa, quanto tempo passaria até lhe dar um murro no nariz? - [38]. Isto significa que a criação da interface deve ser pensada e trabalhada de acordo com os utilizadores para os quais está a ser construída.

Uma boa interface deve ser simples, deve evitar elementos desnecessários e usar uma linguagem clara para as mensagens que são despoletadas. Deve ser clara e intuitiva para o utilizador. Todos estes aspetos foram tidos em conta ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Como um dos principais requisitos é desenhar redes elétricas sejam elas no mapa ou na tela, é fundamental que a interface tenha uma grande área para esse efeito e, por isso, a interface da aplicação está estruturada de forma a aproveitar o ecrã da melhor forma. O ecrã inicial da aplicação está representado na Figura 19.

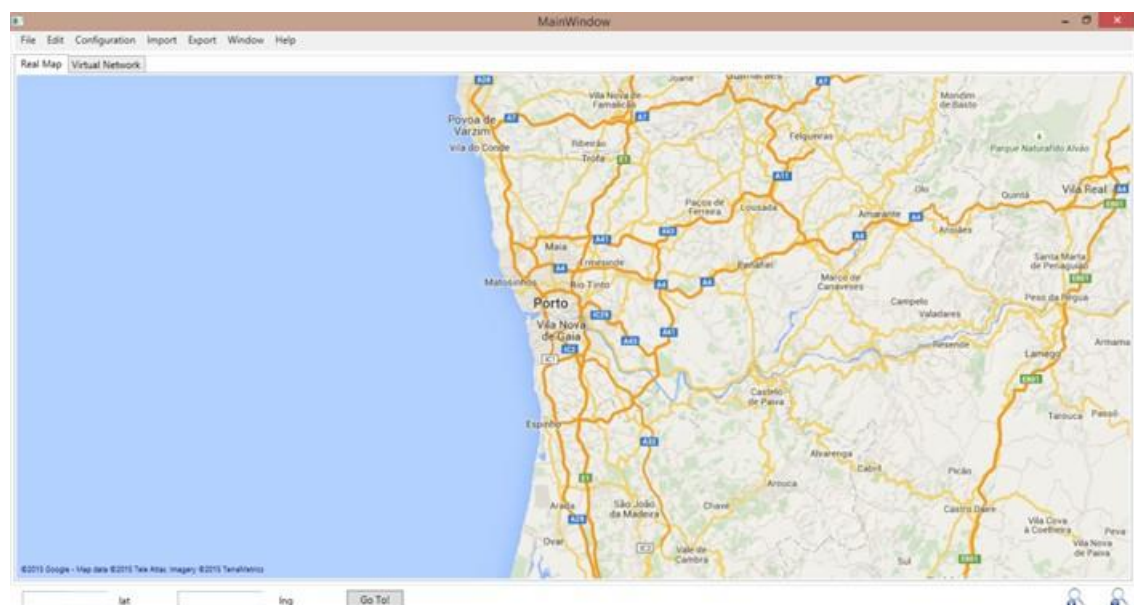


Figura 19 – Interface final da aplicação.

A interface gráfica encontra-se dividida em três áreas: A barra de menus, a área de desenho da rede e o rodapé, abordadas individualmente de seguida.

6.2.1.1 Barra de Menus

A barra de menus está presente em quase todas as interfaces de software, e deve ser algo prático e simples de usar. As opções existentes nesta aplicação são:

Edit

Neste momento, este menu apenas contém a opção *“Clear power grid”* que permite ao utilizador apagar todos os constituintes que já tenha criado na rede para reiniciar a sua criação. Esta ação exige confirmação do utilizador caso já exista algum barramento na rede, caso contrário avisa o utilizador que não existe rede criada.

Configuration

Contém as opções “*New type of Player*” e “*Delete Type of Player*”. Existem vários tipos de agente e por isso é necessário criar uma funcionalidade que permita gerir os agentes disponíveis para utilização na aplicação. Desta forma, com a primeira opção mencionada é possível criar um agente, definindo a sua identificação e o seu tipo, se é um comprador, vendedor ou ambos. Na segunda opção é possível remover um tipo de agente, que eventualmente tenha deixado de fazer sentido. É apresentada uma lista dos agentes existentes e é possível seleccionar um ou mais agentes para eliminar.

Import

Contém as opções “*Import Grid*”, “*Import Results*” e “*Import Players Results*”. A primeira opção permite importar uma rede através de um ficheiro *excel*. O utilizador pode importar uma rede completa com barramentos, agentes e linhas, como também pode importar barramentos e agentes sem as linhas e adicioná-las posteriormente. A segunda opção apenas está disponível após a importação dos resultados dos agentes estar concluída. Esta opção permite importar os dados resultantes do cálculo de trânsito de potências e modifica a rede conforme as restrições existentes. *Import Players Results* permite importar os resultados de cada agente, ou seja, o que cada agente vendeu e comprou em cada período.

Export

Permite exportar a constituição da rede para um ficheiro *excel*.

6.2.1.2 Área de desenho

A área de desenho contém dois separadores. Num deles está o mapa - Real Map - (como visto na Figura 19) e o no segundo - Virtual Network - está uma tela em branco para ser possível Desenhar redes que não estejam associadas a coordenadas geográficas, como se pode ver na Figura 20.

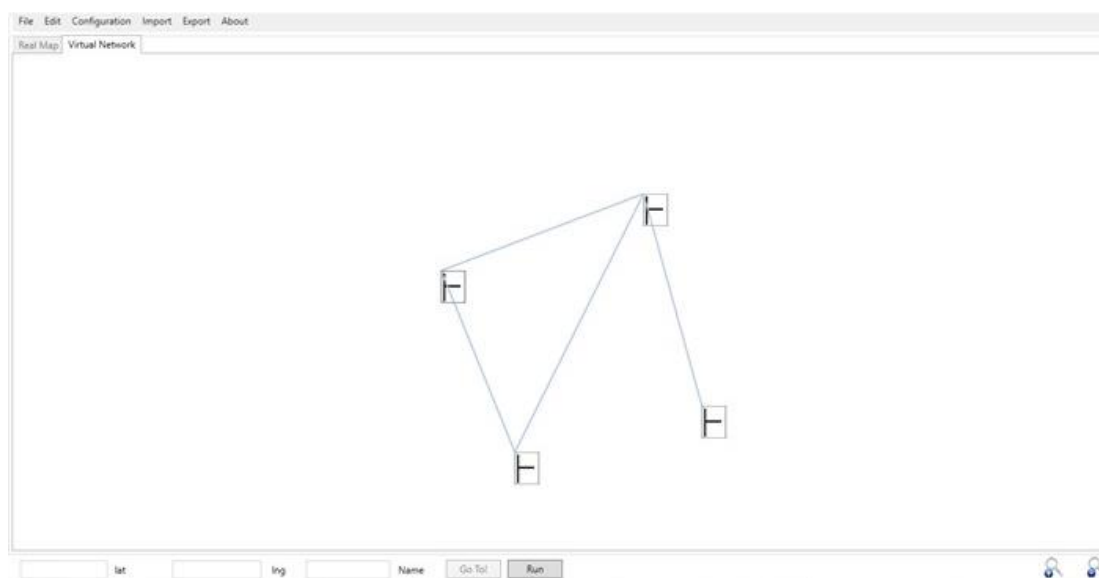


Figura 20 – Virtual Network

Numa primeira abordagem, optou-se por criar uma interface com uma barra lateral onde estivessem disponíveis, à distância de um clique, todas as funcionalidades possíveis, como se pode ver na Figura 21.

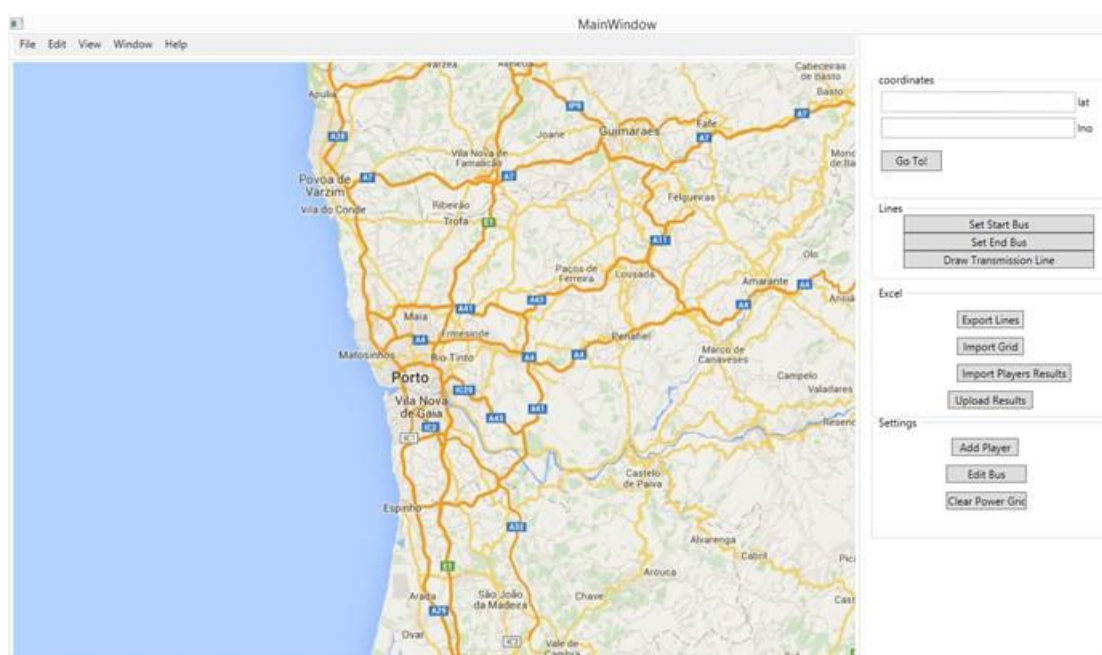


Figura 21 – Interface inicial

No entanto, muito do espaço do ecrã era ocupado por botões. Por essa razão, e tendo em conta que seria importante usar o máximo de espaço possível para a criação da rede, decidiu-se usar menus de contexto o que retira a área de botões e deixa muito espaço livre sem ser necessário recorrer tantas vezes à utilização de *zoom*.

O menu de contexto é despoletado com o botão direito do rato sobre o mapa ou sobre a tela, como pode ser visto na Figura 22.

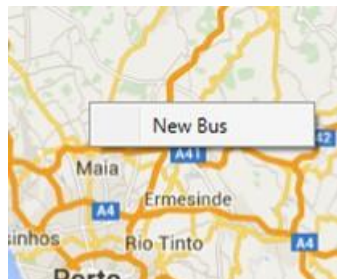


Figura 22 – Menu flutuante de criação de Barramento

6.2.1.3 Rodapé

A área de rodapé tem opções de pesquisa no mapa e de *zoom*. Do lado esquerdo existem duas caixas de texto onde é possível pesquisar as coordenadas geográficas, ao centro existe uma caixa de texto onde é possível pesquisar pelo nome da cidade/local e do lado direito estão os botões de zoom-in e zoom-out.

6.3 Solução

Como abordado no subcapítulo anterior, a o padrão arquitectural para construção da solução escolhido foi MVVM.

Neste caso, *Model* é a rede elétrica, ou como descrita no projeto a *class PowerGrid*. A *View* é cada um dos ecrãs da aplicação. Cada *View* liga-se ao *Model* através do *ViewModel*. A comunicação entre classes pode ser vista na Figura 23, usando como exemplo a janela de criação de Agentes.



Figura 23 - Comunicação entre *View* e *Model* da janela *PlayerWindow*

A classe *PowerGrid* é um *singleton*. *Singleton* é um padrão de *software* utilizado para que uma classe seja única no projeto. Ou seja, não é possível inicializar mais do que uma instância ao mesmo tempo. Este padrão é essencial, pois só será necessário trabalhar com uma rede de cada

vez. Por isso, ao criar a rede todos os elementos são inseridos na classe *PowerGrid*, sem que existam sobreposições ou outras redes.

A *PowerGrid* contém os seguintes atributos:

```
public class PowerGrid
{
    public List<Bus> Buses { get; set; }
    public List<TransmissionLine> Lines { get; set; }
    public bool HasSlackBus { get; set; }
}
```

Código 1 - Atributos da classe *PowerGrid*

Uma rede elétrica contém barramentos (*List<Bus> Buses*) e linhas de transmissão que ligam os barramentos (*List<TransmissionLine> Lines*). Por sua vez, os barramentos contêm agentes, como pode ser vista no excerto de Código 4, que representa as propriedades da classe *Bus*.

```
public class Bus
{
    public double Voltage;
    public string Name { get; set; }
    public double NominalVoltage { get; set; }
    public double? Angle { get; set; }
    public bool IsSystemSlackBus { get; set; }
    public int Number { get; set; }
    public string Type { get; set; }
    public List<Player> Players { get; set; }
    public GMapMarker Marker { get; set; }
    public Point PointX { get; set; }
}
```

Código 2 - Atributos da classe *Bus*

Cada barramento possui algumas características: o seu nome (*Name*) para ser reconhecido, a tensão (*NominalVoltage*), o ângulo (*Angle*), um booleano que indica se aquele barramento é o barramento de referência da rede (*IsSystemSlackBus*), o seu tipo (*Type*) que pode ser PV, PQ ou PRef e o conjunto de agentes que estão no barramento (*Players*).

Neste projeto é possível criar uma rede real ou uma rede virtual. Caso a rede que esteja a ser criada seja num mapa, o barramento contém um conjunto de coordenadas geográficas (*Marker*) e caso seja uma rede virtual, contém um conjunto de pontos, que correspondem à sua posição no ecrã (*PointX*). Em relação à classe *Player* (Agente), os seus atributos podem ser visualizadas no excerto de Código 5.

```

public class Player
{
    public string Name { get; set; }
    public int BuyerOrGeranator { get; set; }
    public double Quantity { get; set; }
}

```

Código 3 - Propriedades de um objeto *Player*

Um agente tem um nome (*Name*) que o distingue dos outros, um tipo que indica se é comprador ou vendedor (*BuyerOrGenerator*) e a quantidade de energia que tem para vender ou que pretende comprar (*Quantity*). Existem algumas restrições na criação de um agente. Se o agente for criado num barramento do tipo PV e PRef só poderão ser criados agentes vendedores. Se o barramento for do tipo PQ, por exemplo, só poderão ser criados agentes compradores. Para isto, existe uma lista de escolha do tipo do agente que apenas mostra os tipos disponíveis para aquele tipo de barramento em causa, ilustrada na Figura 24.

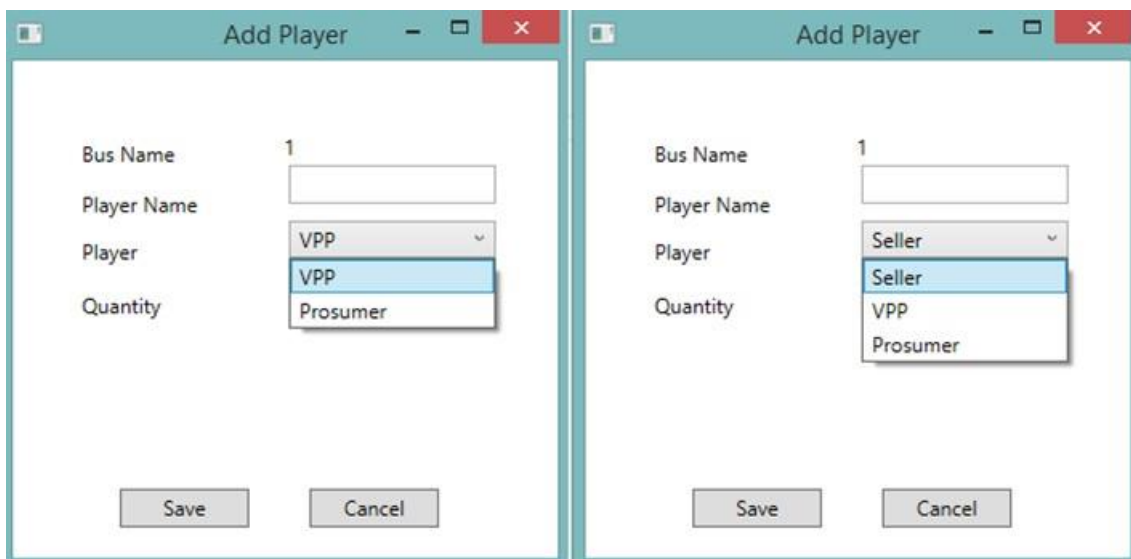


Figura 24 – Representação de duas janelas de criação de agentes: à esquerda num barramento do tipo “PQ” e à direita num barramento do tipo “PV”

Na janela à esquerda da Figura 24, os tipos de agente possíveis de criar num barramento do tipo “PQ” são apenas o VPP e o *prosumer* – junção das palavras *production* e *consumer*. Estes agentes têm nas suas definições que podem comprar e vender. É por esta razão que aparecem, também, na janela à direita com a adição do agente *Seller*, que apenas pode vender. Os tipos de agente disponíveis são definidos pelo utilizador, sendo possível a criação de novos tipos de agente ou a remoção de algum que eventualmente deixe de fazer sentido. Para criar um novo agente é necessário dar-lhe um nome e indicar qual o tipo de propostas que pode apresentar em mercado: compra, venda ou ambas. Na Figura 25, pode-se ver a janela de criação de novos agentes.



Figura 25 – Janela de inserção de novo tipo de agente

Para remover um agente, basta usar a opção *Delete Type of Player* no menu *Configuration*. A janela que aparece apresenta uma lista de todos os tipos de agente já inseridos pelo utilizador. Na Figura 26, está ilustrada a janela de eliminação de agentes.

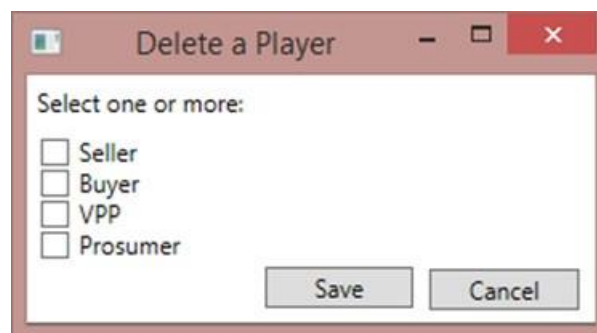


Figura 26 – Janela de eliminação de agentes

Os tipos de agente são guardados num ficheiro de XML, que é lido pela aplicação quando é necessário listar os tipos de agentes disponíveis.

O ficheiro tem como raiz o nó *Players* que agrega todos os agentes que o utilizador inseriu. Cada nó *Player* pertence a um só agente que indica se:

- O *player* tem produção através do atributo *production*. Se o seu valor for *Yes*, então este agente é produtor;
- O *player* tem consumo através do atributo *consumption*. Se o seu valor for *Yes*, então este agente produz. Se o seu valor for *"No"*, este agente não consome.

Ambos os atributos podem estar com valor de *"Yes"* pois existem agentes que podem consumir e produzir.

6.3.1 Ficheiros

A aplicação utiliza ficheiros *excel* com *templates* pré-definidos para a importação e exportação de dados. Podem ser importados 3 tipos de ficheiros: rede, resultados de mercado e resultados do cálculo de trânsito de potências. Sendo apenas exportado um tipo de ficheiro.

6.3.1.1 Importação da rede

O ficheiro de importação da rede tem 3 folhas, divididas por *Bus*, *Players* e *Lines*. Para inserir uma rede no mapa não é necessário ter as três folhas com dados. Para que a rede seja criada com sucesso e sem erros pode apenas ser inserida a folha com os dados dos barramentos (denominada *Bus*), sem linhas e sem agentes, pois poderão ser inseridos posteriormente. A folha *Bus* só pode estar vazia no caso de os barramentos já terem sido inseridos no mapa, porque caso contrário não se irá conseguir associar os agentes e as linhas na rede.

A primeira folha deste ficheiro é a *Bus*, cuja constituição está representada na Figura 27. Cada linha da folha representa um barramento.

	A	B	C	D	E	F
1	Bus Address	Bus name	Nominal Voltage	Voltage	Angle	Slack Bus
2	41,1997461;-8,4638233	1	0,2	0,3	0,4	1
3	41,2135648;-8,5021038	2	0,3	0,6	0,8	0
4	41,1924968;-8,4308704	3	0,8	0,9	1	0
5	41,178609;-8,4721549	4	5	8,2	1	0
6	41,1032934;-8,5474431	5	1	2	1	0
7	41,1075502;-8,5578238	6	2	2	2	0

Figura 27 - Folha de barramentos

A coluna A (*Bus Address*) contém coordenadas, nas quais deverá ser criado o barramento. Se o utilizador preferir, pode também escrever o nome da localidade (ex: Porto). A coluna B (*Bus Name*) é o nome que deve ser dado ao barramento. As colunas C, D e E são, respetivamente, *Nominal Voltage*, *Voltage* e *Angle*. A coluna F indica se o barramento é o barramento de referência da rede, caso o valor da célula seja 1, ou não, caso o valor da célula seja 0.

A folha dos agentes está representada na Figura 28.

Player	P (p.u.)	Bus	Type
1	30	1	1
2	20	1	2
3	30	1	3
4	40	2	1
5	50	4	1
6	30	4	3
7	20	5	2
8	20	6	3

Figura 28 - Folha dos agentes

Esta folha contém um agente por linha. A coluna A (*Player*) contém o nome do agente, a coluna B (P p.u.) a quantidade de energia consumida ou produzida pelo agente. A coluna C (*Bus*) contém o nome do barramento onde o agente se insere. Este nome deve existir na folha de barramentos, caso contrário, o agente não será criado. A coluna D (*Type*) indica qual o tipo de barramento que estamos a criar: consumidor ou produtor.

A folha de linhas está representada na Figura 29.

A	B	C	D	E	F
bus i	bus j	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,1	0,2	0,04	40
1	4	0,05	0,2	0,04	60
1	5	0,08	0,3	0,06	40
2	3	0,05	0,25	0,06	40
2	4	0,05	0,1	0,02	60
2	5	0,1	0,3	0,04	30
2	6	0,07	0,2	0,05	90
3	5	0,12	0,26	0,05	70
3	6	0,02	0,1	0,02	80
4	5	0,2	0,4	0,08	20
5	6	0,1	0,3	0,06	40

Figura 29 - Folha das linhas

As colunas A e B (*bus i* e *bus j*) representam os dois barramentos ligados pela linha de transmissão. A coluna (R p.u.) é o valor da resistência em série da linha. A coluna D (X p.u.) é valor da impedância indutiva em série da linha. A coluna E (B p.u.) é o valor da impedância capacitiva em paralelo da linha e a coluna F (Smax p.u.) é o valor da potência máxima que pode passar na linha.

Depois de importado todo o ficheiro, a rede é desenhada no mapa e o utilizador pode alterá-la, inserir mais agentes, mais linhas ou mais barramentos.

6.3.1.2 Resultados de mercado

Os resultados de mercado são transmitidos num ficheiro com a quantidade de energia transacionada em cada período por cada agente. Contém duas folhas, uma de compradores e outra de vendedores. Cada linha de cada folha (a partir da linha 3) representa um agente. A linha 2 contém, por coluna, cada período analisado. Na Figura 30 está representada a folha de Vendedores.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Player	Amount										
2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
4	2	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
5	5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
6	6	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
7	7	0	0	0	0	0	0	50	50	50	50	50
8												

Figura 30 - Vendedores

Na Figura 30 estão representados 11 períodos de negociação. Por cada célula de cruzamento de período com agente, está representada a quantidade de energia vendida naquele período, pelo respetivo agente.

A folha de Compradores está representada na Figura 31.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Player	Amount										
2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	3	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
4	4	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
5	5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
6	6	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
7	7	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0

Figura 31 - Compradores

A folha de compradores segue a mesma lógica da folha de vendedores, mostrando apenas os agentes que compraram energia. Comparando as duas figuras, é possível perceber que apenas se repete um agente: o 7, um agente *prosumer*. Na folha de vendedores, até ao período 6, o agente 7 tem uma quantidade de energia vendida de 0. No entanto, nos mesmos períodos, na folha de compradores vemos que o agente tem quantidade comprada. Nos períodos seguintes, estes valores invertem-se. Isto significa que durante os primeiros 6 períodos de transação o agente 7 foi um agente de compra de energia, mas nos restantes vendeu energia.

6.3.1.3 Cálculo de trânsito de potências

O ficheiro de resultados de cálculo de trânsito de potências é gerado por período, ou seja, num mercado com 24 períodos de negociação são gerados 24 ficheiros para análise. Este ficheiro indica se existiu congestionamento na rede, mostrando vários cálculos sobre um barramento e sobre as linhas, como por exemplo o valor do módulo de tensão no barramento, ou o valor do ângulo de tensão. É um ficheiro excel constituído por 6 folhas. A primeira folha está representada na Figura 32.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	bus	V (p.u.)	Theta (p.u.)	P load (p.u.)	Q load (p.u.)	P gen (p.u.)	Q gen (p.u.)	Q cap (p.u.)
2	1	1	0	30	24,39488677	50,58786161	6,906651273	3,464101615
3	2	0,87	-1,264224887	40	16	0	0	0
4	3	1,003658	99	0	0	0	0	0
5	4	1	-1,502070733	50	20	30	24,1112128	0
6	5	1,15	0,206025707	0	12,39488677	20	1,99307E-11	3,464101615
7	6	1	-109	0	0	20	-15,65429334	0

Figura 32 - Folha 1

A primeira folha mostra a informação de cada barramento existente na rede. Cada linha relativa a um barramento. As colunas são:

- A coluna A (bus) contém o nome do barramento;
- A coluna B (V) contém o valor do módulo da tensão no barramento;
- A coluna C (Theta) contém o valor do ângulo da tensão do barramento;
- A coluna D (P load) contém o valor da potência ativa consumida no barramento;
- A coluna E (Q load) contém o valor da potência reativa consumida no barramento;
- A coluna F (P gen) contém o valor da potência ativa produzida no barramento;
- A coluna G (Q gen) contém o valor da potência reativa produzida no barramento;
- A coluna H (Q cap) contém o valor da potência reativa produzida nos condensadores do barramento.

A folha 2 está representada na Figura 33.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Bus i	Bus j	Direction i-j			Direction j-i			P loss (p.u.)	Q loss (p.u.)
2			P (p.u.)	Q (p.u.)	S (p.u.)	P (p.u.)	Q (p.u.)	S (p.u.)		
3	1	2	9,996151	-3,94125	55	-9,89246	0,172048	50	0,103691477	0,207382953
4	1	4	12,37599	-4,92219	13,3189	-12,2951	1,245596	12,35807	0,080852174	0,323408697
5	1	5	-1,78428	-5,1607	100	1,790563	-0,86343	1,987869	0,006281826	0,023556848
6	2	3	-8,67496	-4,93353	9,979717	8,714998	-0,85316	50	0,040034062	0,200170311
7	2	4	0,969996	-7,30191	7,366059	-0,94935	5,354908	5,438411	0,020643065	0,041286131
8	2	5	-9,05044	-3,41873	9,67461	9,13542	-0,33469	9,141549	0,084985244	0,254955732
9	2	6	-13,3521	-0,51787	13,36218	13,48111	-4,08435	100	0,128975399	0,368501141
10	3	5	-2,1984	-3,1426	3,835217	2,204624	-1,90198	2,911686	0,006221625	0,013480187
11	3	6	-6,5166	3,995756	110	6,529996	-5,93608	8,824846	0,013401148	0,067005741
12	4	5	-6,75551	-2,48929	7,199546	6,851346	-5,38261	8,712832	0,095838252	0,191676504
13	5	6	0,018046	-0,39301	0,393427	-0,01111	-5,63386	5,63387	0,006937336	0,020812009

Figura 33 – Folha 2

A folha 2 mostra dados relativos a todas as linhas de transmissão da rede. As suas colunas são:

- A coluna A (Bus i) contém o nome do barramento onde começa a linha;
- A coluna B (Bus j) contém o nome do barramento onde termina a linha;
- A coluna C (Pij) contém o valor da potência ativa que circula na linha do sentido i para j;
- A coluna D (Qij) contém o valor da potência reativa que circula na linha do sentido i para j;
- A coluna E (Sij) contém o valor da potência aparente que circula na linha do sentido i para j;

- A coluna F (P_{ji}) contém o valor da potência ativa que circula na linha do sentido j para i;
- A coluna G (Q_{ji}) contém o valor da potência reativa que circula na linha do sentido j para i;
- A coluna H (S_{ji}) contém o valor da potência aparente que circula na linha do sentido j para i;
- A coluna I (P_{loss}) contém o valor das perdas ativas na linha;
- A coluna J (Q_{loss}) contém o valor das perdas reativas na linha.

A folha 3 contém apenas uma célula que indica se existiu algum problema com a rede, ou seja, se em alguma linha existiu congestionamento. O seu valor pode ser 1 caso exista congestionamento, ou 0 em caso contrário.

A folha 4, representada na Figura 34, contém os dados relativos a cada linha de transmissão com congestionamento.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Bus i	Bus j	S _{ij} (p.u.)	S _{ji} (p.u.)	S _{max} (p.u.)	S _{ij} -S _{max} (p.u.)	S _{ji} -S _{max} (p.u.)
2	1	2	55	50	40	15	10
3	1	5	100	1,98786903	40	60	0
4	2	3	9,97971672	50	40	0	10
5	2	6	13,3621763	100	90	0	10
6	3	6	110	8,82484572	80	30	0

Figura 34 - Folha 4

As suas colunas são:

- A coluna A (Bus i) contém o nome do barramento onde começa a linha;
- A coluna B (Bus j) contém o nome do barramento onde termina a linha;
- A coluna C (S_{ij}) contém o valor potência aparente que circula na linha do sentido i para j;
- A coluna D (S_{ji}) contém o valor da potência aparente que circula na linha do sentido j para i;
- A coluna E (S_{max}) contém o valor de potência máxima que pode passar na linha;
- A coluna F (S_{ij}-S_{max}) contém o valor da diferença entre a potência que circula de i para j e a potência máxima;
- A coluna (S_{ji}-S_{max}) contém o valor da diferença entre a potência que circula de i para j e a potência máxima.

A folha 5 e a folha 6 mostram alguns dados relativos aos barramentos que foram afetados pelo congestionamento de linhas. Na Figura 35 está representada a folha 5 e na Figura 36 está representada a folha 6.

	A	B	C	D
1	Bus	V (p.u.)	Vlimit (p.u.)	Vlimit-V (p.u.)
2	2	0,87	0,9	0,03
3	5	1,15	1,1	0,05

Figura 35 - Folha 5

As suas colunas são:

- A coluna A (*Bus*) contém o nome do barramento da rede;
- A coluna B (V) contém o valor do módulo da tensão do barramento;
- A coluna C (Vlimit) contém o valor máximo ou mínimo do módulo da tensão;
- A coluna D (Vlimit-V) contém o valor da diferença entre o valor limite e valor obtido.

	A	B	C	D
1	Bus	Theta (p.u.)	Thetalimit (p.u.)	Thetalimit-Theta (p.u.)
2	3	99	90	9
3	6	-109	-90	-19

Figura 36 - Folha 6

- A coluna A (*Bus*) contém o nome do barramento da rede;
- A coluna B (θ - *Theta*) contém o valor do ângulo da tensão do barramento;
- A coluna C (θ limit) contém o valor máximo ou mínimo do angulo da tensão;
- A coluna D (θ limit- θ) contém o valor da diferença entre o valor limite e valor obtido.

Após a importação deste ficheiro, a aplicação mostra ao utilizador a informação das linhas. No sub-capítulo 6.4.4 é descrita em pormenor a informação apresentada ao utilizador.

6.3.1.4 Exportação

A aplicação permite a exportação da rede criada pelo utilizador. É gerado um ficheiro excel com a mesma formatação do ficheiro de importação da rede, descrito no início deste subcapítulo. Contém três folhas relativas a barramentos, agentes e linhas como as representadas nas figuras 27, 28 e 29, o que permite a sua posterior importação para novo estudo.

6.4 GMap.NET

Antes de iniciar a implementação da aplicação com recurso a esta API, numa primeira fase foi elaborado um protótipo, em que o primeiro elemento a ser construído foi o mapa. Depois de se ter explorado o objeto mapa (nomeadamente eventos e posições do rato), avançou-se para a criação de marcadores e linhas.

6.4.1 Mapa

A criação do mapa é simples, sendo necessário criar uma janela e no XAML colocar apenas uma linha de código, onde se indica que a *source* é a classe *Map*.

Map é uma classe que deriva da classe *GMapControl*. Ambas as classes já estão definidas no GMap, não sendo necessária qualquer alteração, a não ser que o programador necessite de algo que ainda não está previamente implementado.

É possível associar o evento *KeyDown* ao mapa, o que permite verificar qual a tecla pressionada pelo utilizador. Diferentes teclas permitem diferentes comportamentos. As teclas possíveis para efetuar ações no mapa, são:

- **Delete:** Ao selecionar um barramento e clicando na tecla “Delete” o barramento é eliminado do mapa;
- **E:** Ao selecionar um barramento e a tecla “E” é aberta a janela de edição de barramentos;
- **I:** Em conjunto com a seleção de um barramento, esta tecla abre a janela de criação de um barramento.

Aquando da criação da janela do mapa, é necessário inicializar algumas propriedades do mapa para o seu correto funcionamento. No excerto de Código 6, podem ser vistas as propriedades inicializadas na janela principal.

```
mapControl.MapProvider = GMapProviders.GoogleMap;
mapControl.MinZoom = 0;
mapControl.MaxZoom = 18;
mapControl.Zoom = 10;
mapControl.ShowCenter = false;
mapControl.DragButton = MouseButton.Right;
mapControl.Position = new PointLatLng(41.127917990322814, -
8.59130859375);
mapControl.OnMapZoomChanged += new
MapZoomChanged(mapControl_OnMapZoomChanged);
mapControl.MouseRightButtonDown += new
MouseButtonEventHandler(mapControl_MouseRightButtonDown);
mapControl.MouseDoubleClick += new
MouseButtonEventHandler(mapControl_MouseDoubleClick);
mapControl.MouseRightButtonUp += new
MouseButtonEventHandler(mapControl_MouseRightButtonUp);
mapControl.OnMapDrag += new MapDrag(mapControl_OnMapDrag);
```

Código 4 - Inicialização de propriedades do mapa

MapProvider serve para selecionar o mapa a usar. Como visto no capítulo 4.1.3, GMap.NET permite utilizar inúmeros mapas (Google, Yahoo...) e é com o MapProvider que se pode alterar o mapa a usar.

MinZoom, **MaxZoom** e **Zoom** são as definições de *zoom*. Existem 19 níveis de *zoom* (0-18), sendo 18 o nível de rua e o 0 o nível global. O *zoom*, por defeito, está no nível 10.

ShowCenter permite decidir se se pretende que apareça uma cruz no centro do mapa. Neste caso está a *false*, o que significa que a cruz não irá aparecer.

DragButton permite escolher o botão para executar o *drag* do mapa, ou seja, é o botão que permite mover o mapa. Neste caso foi escolhido o botão direito do rato.

Position permite determinar a posição em que o mapa estará quando a janela abrir. Neste caso está centrado no Porto.

OnMapZoomChanged é o evento que trata da alteração do *zoom* por parte do utilizador.

MouseRightButtonDown é o evento despoletado quando o botão direito do rato é pressionado.

MouseDoubleClick é o evento que responde ao duplo clique no botão direito do rato executado pelo utilizador. O evento guarda o sítio onde o utilizador clicou. Para isso, são usadas as coordenadas X e Y do ecrã e convertidas para coordenadas GPS através da função do mapa `FromLocalToLatLng(int X, int Y)`.

MouseRightButtonUp é o evento que responde ao clique do botão direito do rato.

OnMapDrag é o evento que arrasta o mapa, quando o utilizador utiliza o botão e a técnica de *drag*.

Com estas propriedades configuradas, é possível correr a aplicação e utilizar o mapa sem restrições. No entanto, nesta aplicação são usados menus flutuantes para que o espaço não seja ocupado com demasiados botões. Por isso, é necessário criar um menu flutuante no mapa. O menu flutuante pode ser criado de duas formas: em XAML ou através de código C# (*code-behind*). No caso do mapa optou-se por criar no *code-behind*, uma vez que o botão de *drag* e o botão do menu flutuante é o mesmo. Ao utilizar o mesmo botão para estas duas ações, caso o menu flutuante fosse criado em XAML, daria conflito e o menu flutuante apareceria sempre primeiro sem dar oportunidade de o utilizador arrastar o mapa. Ao criar no *code-behind*, há a possibilidade de manipular as ações, para que nunca entrem em conflito e para garantir que sempre que o utilizador pretenda uma delas, é essa que irá aparecer.

Para conseguir distinguir as duas ações, é utilizado o evento *OnMapDrag*. Sempre que o evento é despoletado, é ativada uma *flag* que nos indica que o utilizador está a arrastar o mapa e o menu de contexto é escondido. Por outro lado, quando o utilizador clica no mapa com o botão direito do rato, é despoletado o evento `mapControl_MouseRightButtonUp` cujo código está descrito no excerto 7.


```

void mapControl_MouseRightButtonUp(object sender, MouseButtonEventArgs e)
{
    if (!IsDragging)
    {
        ContextMenu cMenu = new ContextMenu();
        MenuItem mItem = new MenuItem();
        mItem.Header = "New Bus";
        mItem.Click += MenuItemNewBus_OnClick;
        cMenu.Items.Add(mItem);
        mapControl.ContextMenu = cMenu;
    }
    IsDragging = false;
}

```

Código 5 - Evento MouseRightButtonUp

Nesta função é verificada se a *flag* `isDragging` está a *false*, e caso esteja, é criado o objeto **cMenu** do tipo `ContextMenu`. No **cMenu** é inserido o único item de menu disponibilizado no mapa, o “New Bus”. Para isso, é criado um objeto **mItem** do tipo `MenuItem` e adicionado o evento que é associado ao clique. O **mItem** é associado ao **cMenu**, que posteriormente é associado ao menu flutuante do mapa. A *flag* é colocada a *false*, sempre que o evento `MouseRightButtonDown` é despoletado.

6.4.2 Barramentos

O modo de criação dos barramentos difere no mapa e na tela. No mapa, são usados componentes próprios do GMap.Net para garantir o bom funcionamento da aplicação. Na tela são utilizados componentes nativos dos WPF.

Os barramentos, no mapa, são marcadores que indicam as coordenadas onde o barramento real se encontra. O barramento é uma imagem associada a um objecto `Bus` e a um ponto no mapa.

Para criar a imagem na aplicação é necessário criar uma imagem XAML, descrevendo o local do projecto onde essa imagem está. O menu flutuante dos barramentos é criado no XAML, ao contrário do que foi feito no mapa. No XAML, o menu flutuante é criado conforme o excerto de Código 8.

```

<Image.ContextMenu>
  <ContextMenu>
    <MenuItem Header="Edit Bus" Click="MenuItemEditBus_OnClick"/>
    <MenuItem Header="Delete Bus"
      Click="MenuItemDeleteBus_OnClick"/>
    <Separator/>
    <MenuItem Header="Add Player"
      Click="MenuItemAddPlayer_OnClick"/>
  </ContextMenu>
</Image.ContextMenu>

```

Código 6 - Menu flutuante do barramento

O barramento está pronto para ser utilizado no mapa ou na tela. O primeiro passo para a criação do barramento é criá-lo com o auxílio da janela de criação. Nos sub-capítulos que se seguem, serão descritas as formas de utilização do barramento no mapa e na tela.

6.4.2.1 Criação de Barramentos no Mapa

Para criar a imagem, é necessário saber o ponto onde o utilizador o pretende colocar, algo que o utilizador já fez ao clicar no mapa. No excerto de Código 9, é possível visualizar a parte da criação do barramento do evento *MouseDoubleClick*.

```

        GMapMarker gMarker = new GMapMarker(point);
        {
            Placemark pMark = new Placemark();

            GeoCoderStatusCode status;
            var plret = GMapProviders.GoogleMap.GetPlacemark(point,
out status);
            if (status == GeoCoderStatusCode.G_GEO_SUCCESS &&
plret != null)
            {
                if (plret.HasValue)
                {
                    pMark = plret.Value;
                }
            }
            gMarker.ZIndex = 55;
        }
        string lastBus = ViewModel.GetLastBusNameInserted();
        CustomMarker CMarker = new CustomMarker(this, gMarker,
lastBus, 0);
        gMarker.Shape = CMarker;
        mapControl.Markers.Add(gMarker);

```

Código 7 - Criação de barramento

Primeiro, é necessário criar um objeto *GMapMarker* utilizando o ponto de clique do rato, com um *PlaceMark* e todas as validações necessárias. Este objeto é aquele que fica no sítio escolhido enquanto o *CustomMarker* é a forma dada ao objeto *GMapMarker*. Cria-se o objeto *CustomMarker* que posteriormente é adicionado à *Shape* do *GMapMarker* criado anteriormente. O objeto **gMarker** é adicionado aos restantes marcadores do mapa e é, finalmente, visualizado. A última instrução serve para atualizar o marcador do barramento inserido na *PowerGrid*. Isto serve para que se consiga relacionar diretamente e de forma simples o marcador com o barramento que ele representa.

6.4.2.2 Criação de Barramentos na Tela

O uso de uma imagem na tela é mais simples do que no mapa. São necessários menos passos e procedimentos. No excerto de Código 10 está parte do método que desenha a imagem na tela.

```
Point p = Mouse.GetPosition(MainCanvas);
BusWindows busOp = new BusWindows();
bool? var = busOp.ShowDialog();//enviar parametro
this.IsEnabled = false;
if (var == true)
{
    string lastBus = ViewModel.GetLastBusNameInserted();
    CustomMarker CMarker = new CustomMarker(this, lastBus,
p);
    // CustomMarker CMarker1 = new CustomMarker(this,
lastBus, p);
    CMarker.PointX = p;
    PowerGrid.Instance.All.Add(CMarker);
    MainCanvas.Children.Add(CMarker);
    Canvas.SetLeft(CMarker, p.X);
    Canvas.SetTop(CMarker, p.Y);
    ViewModel.AddMarkerToBus(p, lastBus);
}
```

Código 8 - Desenhar imagem na tela

No excerto de código anterior, a primeira instrução deteta o ponto onde o utilizador clicou. De seguida, a janela de criação do barramento é despoletada e, após o seu fecho e caso o barramento tenha sido criado com sucesso, é criado o objeto *CustomMarker* com a imagem que se pretende. De seguida, atualiza-se o ponto de coordenada do *CMarker* para o ponto **p** e, finalmente, é inserido nos componentes da tela. As instruções *SetLeft* e *SetTop* servem para centrar a imagem no ponto onde se clicou. De seguida, adiciona-se o marcador ao barramento já existente na *PowerGrid*.

6.4.3 Linhas

Tal como na criação dos barramentos, a criação das linhas é diferente no mapa e na tela. São usados componentes do GMap.NET na criação de linhas no mapa, e componentes do WPF na criação de linhas na tela.

A criação de uma linha, como já visto anteriormente, é despoletada após o utilizador arrastar o rato entre dois barramentos. Nesse momento, aparece a janela de criação da linha, e ao clicar em *Save*, à semelhança do que acontece nos barramentos, a linha é adicionada à *PowerGrid* e posteriormente é desenhada no mapa. No entanto, ao contrário dos barramentos e para a criação no mapa, para desenhar a linha são necessários certos cuidados antes de despoletar a janela de características da linha.

6.4.3.1 Criação de Linhas no Mapa

Para desenhar a linha no mapa utilizou-se o objeto *GMapRoute*. Este objeto possibilita o desenho de uma linha com vários pontos, o que significa que se poderá ter uma linha que acompanhe uma rota e que navegue pelas ruas tal como no GPS. Neste caso não são necessários mais do que dois pontos: as coordenadas do primeiro barramento e as coordenadas do segundo. Estas coordenadas são guardadas em momentos distintos:

- Quando o utilizador clica no primeiro barramento, são guardadas na variável *StartRoute* as suas coordenadas;
- Após o utilizador arrastar o rato até ao segundo barramento, e após libertar o botão do rato são guardadas, na variável *EndRoute*, as coordenadas do segundo barramento.

Por isso, para criar a linha é necessário criar uma lista de coordenadas que deverão ser associadas ao objeto *GMapRoute*. Previamente são verificadas todas as variáveis necessárias *GMapRoute* para continuar, isto é, verifica-se que estão selecionados dois barramentos (variáveis *Origin* e *Destiny*) e que ambos têm coordenadas. A lista é criada da seguinte forma:

```
List<PointLatLng> l = new List<PointLatLng>();  
l.Add(this.StartRoute.Value);  
l.Add(this.EndRoute.Value);
```

Código 9 - Criação da lista

É uma lista de objecto *PointLatLng*, o que significa que guardada a latitude e longitude do ponto.

De seguida, é criado o objeto *GMapRoute* e é despoletada a janela, como visto no excerto de Código 12. Para verificar todos os passos, de forma a registar eficazmente a ocorrência de erros, existe a variável *added* que, dependendo do seu valor, indica se a linha foi criada sem problemas. Caso não se registem problemas, a variável *added* terá o valor de *true*. Neste momento a linha já foi adicionada à *PowerGrid*, sendo necessário adicioná-la aos marcadores do mapa, para que seja visível. Se a variável *added* tem o valor de *true* a linha será, então, adicionada aos

marcadores do mapa, o mapa será centrado para focar os dois barramentos e a linha e a *route* criadas serão adicionada à linha já presente na *PowerGrid*.

```
TransmissionLineWindow lineWindow = new
TransmissionLineWindow(Origin, Destiny);
bool? added = lineWindow.ShowDialog();//enviar parametro
if (added == true)
{
    int lastLine = ViewModel.GetLastLineInserted();
    mapControl.Markers.Add(mRoute);
    mapControl.ZoomAndCenterMarkers(null);
    ViewModel.AddRouteToTransmissionLine(mRoute,
lastLine);
}
```

Código 10 - Adição da linha ao mapa

6.4.3.2 Criação de Linhas na Tela

O processo para desenhar uma linha na tela é diferente. Tal como no mapa, quando o utilizador clica no primeiro barramento as suas coordenadas (desta vez X e Y) são guardadas em variáveis (*StartPoint* e *EndPoint*). Neste caso, a janela de criação da linha é despoletada à partida e, caso o valor da variável seja *true*, é despoletado o seguinte código:

```
Line myLine = new Line();
myLine.Stroke =
System.Windows.Media.Brushes.LightSteelBlue;
myLine.X1 = StartPoint.X;
myLine.X2 = EndPoint.X;
myLine.Y1 = StartPoint.Y;
myLine.Y2 = EndPoint.Y;
myLine.StrokeThickness = 2;
ViewModel.AddRouteToTransmissionLine(myLine, lastLine);
MainCanvas.Children.Add(myLine);
```

Código 11 - Criação de linha e adição à tela

Para criar a linha é necessário ter o ponto X e Y de cada ponta (que são os barramentos) e alterar a sua grossura (*StrokeThickness*) para que seja visível. Posteriormente, o objeto de representação da linha é adicionado à linha presente na *PowerGrid* e é, finalmente, adicionado aos componentes da tela.

6.4.4 Tutorial

A criação de uma rede de energia deve começar sempre com a colocação dos barramentos no mapa ou na tela. A criação dos barramentos pode ser feita de 3 formas distintas:

- Duplo *click* no mapa;
- Clique com o botão direito do rato no mapa, que fará aparecer o menu flutuante;
- Clique com o botão esquerdo do rato no mapa e clique na tecla I.

Após ser utilizada uma destas opções, é despoletada uma janela para que o utilizador insira todos os dados do barramento. Na Figura 37 pode ser vista a janela, com as características que são pedidas ao utilizador.

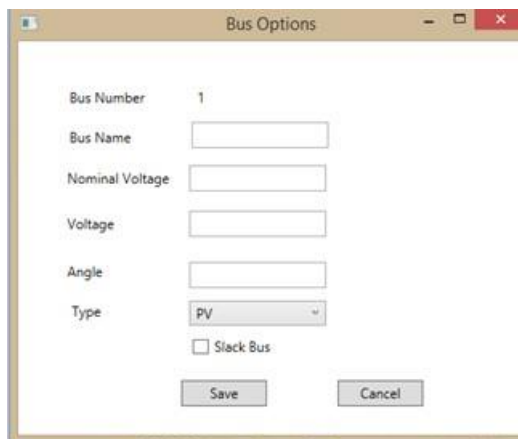


Figura 37 - Janela de criação do barramento

O *Bus Number* é um número identificador do barramento, incrementado automaticamente pela aplicação. O *Bus Name* é o nome do barramento. A *Nominal Voltage* é a sua potência ativa, a *Voltage* é a potência reativa e o *Angle* é o ângulo. O *Type* é o tipo de barramento que, tal como descrito no capítulo 2 pode ser PV, PQ ou PRef.

Ao inserir um barramento aparece uma imagem no mapa, nas coordenadas especificadas, que indica que ali há um barramento. Na Figura 38 é possível visualizar um barramento no mapa após a sua criação.



Figura 38 - Representação de barramento no mapa

Uma vez que a criação de agentes está dependente da criação dos barramentos, estes podem ser criados usando o menu flutuante que é despoletado após o clique com o botão direito do rato em cima do barramento desejado. Na Figura 39 é possível verificar as opções do menu flutuante e a respetiva janela despoletada para inserção dos dados do agente.

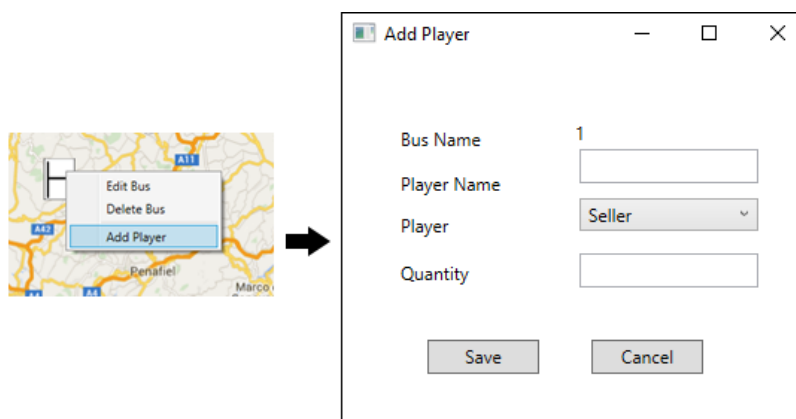


Figura 39 - Criação de agentes

O campo *Bus Name* não pode ser editado, pois indica o barramento que o utilizador selecionou para inserir o agente. *Player Name* é o nome do barramento que é dado pelo utilizador. O campo *Player* tem um conjunto de opções que se adaptam à escolha do barramento. Ou seja, se o utilizador escolher um barramento tipo PQ, só irão aparecer opções de agentes que pretendam comprar energia. O campo *Quantity* serve para o utilizador indicar a quantidade de energia que o agente pretende comprar ou vender.

Ao criar o agente, é possível verificar no barramento quais os agentes que este contém. Para isso basta que o utilizador passe o rato por cima do barramento e será mostrada, numa *pop-up*, a lista de agentes que estão no barramento. Na Figura 40 pode ver-se essa *pop-up*.



Figura 40 - Pop-up com dados do barramento

É possível, também, gerir os agentes presentes num barramento através da janela de edição do barramento.

3.4.2.3 Criação de linhas entre barramentos

As linhas não necessitam de ser criadas após todos os barramentos e agentes estarem criados. Podem ser criadas em qualquer altura desde que os barramentos que o utilizador pretende ligar estejam já criados no mapa. Para inserir uma linha, escolheu-se uma forma muito simples baseada no movimento *Drag And Drop*. O utilizador clica com o botão esquerdo do rato no barramento pretendido e, sem largar, move o rato para o segundo barramento e só aí é que larga o botão. De seguida, é despoletada uma janela, para inserção das características da linha, que se pode ver na Figura 41.

A imagem mostra uma janela de software intitulada "TransmissionLineWindow". No interior, há quatro rótulos de texto alinhados à esquerda: "Reactance", "Resistance", "Apparent Power" e "Max Capacity". Cada rótulo está seguido por um campo de entrada retangular. Na base da janela, há dois botões: "Save" (cinza) e "Cancel" (azul).

Figura 41 - Janela de criação de linha de transmissão

Reactance é a reactância da linha, *Resistance* é a resistência da linha e *Apparent Power* é a potência aparente da linha. Após o utilizador clicar em *Save* a linha é desenhada no ecrã e aparece da forma representada na Figura 42.

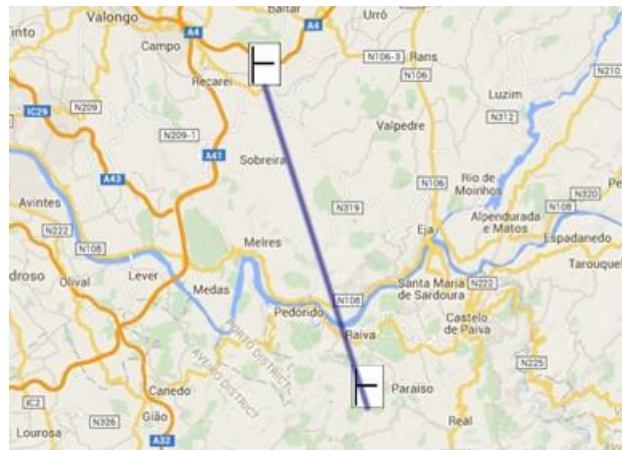


Figura 42 - Linha desenhada entre dois barramentos

3.4.2.4 Edição de barramentos, agentes e linhas

Uma vez que os barramentos, agentes e linhas estão interligados, optou-se por ter uma janela de edição que mostrasse todos os elementos que estão ligados a um dado barramento. Desta forma, caso o utilizador pretenda editar um agente, poderá ver a lista completa de agentes que estão no barramento, ou se pretender editar uma linha, poderá ver todas as linhas que estão ligadas àquele barramento. Desta forma, consegue-se uma visão geral sobre tudo o que engloba o barramento. Na Figura 43 está representada essa janela.

Options of Bus 1

Bus Options

Bus Number: 1 Bus Name: 1
 Nominal Voltage: 1 Voltage: 1
 Type: pv Slack Bus: ☐

Player Options

Remove	Name	Type	Consumption	Production
<input type="checkbox"/>	1	Seller	0	11111

New Delete

Transmission Line Options

Remove	Bus I	Bus J	Resist.	React.	App. Power	Max. Capac.
<input type="checkbox"/>	1	2	1	1	1	1

New Delete
 Save Cancel

Figura 43 - Janela de edição de barramento

A janela de edição de barramentos está dividida em 3 áreas: Características de barramento, agente e linhas.

A primeira área mostra as características definidas na janela de criação do barramento. Todas as características podem ser alteradas com exceção do número identificador do barramento (*Bus Number*). Caso o utilizador selecione um tipo de barramento diferente (*Type*) em que os agentes já introduzidos não se enquadrem, é dada uma mensagem de alerta ao utilizador e este pode anular a ação ou então apagar todos os agentes que não se enquadrem no tipo de barramento escolhido.

A segunda área contém uma lista com todos os agentes que foram previamente inseridos no barramento. Não há restrições de alterações, uma vez que as opções existentes na coluna tipo do agente (*Type*) se alteram conforme o tipo de barramento. A *checkbox* existente na coluna *Remove* serve para o utilizador remover agentes que já não queira ter naquele barramento. Para isso seleciona os agentes pretendidos através das respetivas *checkboxes* e clica no botão “Delete” presente na mesma área de listagem de agentes. É despoletada uma mensagem de confirmação e, caso a resposta do utilizador seja “yes” a lista de agentes é reformulada para excluir os pretendidos. É, também, possível incluir mais agentes através desta janela. Para isso basta clicar no botão *New* e uma nova linha em branco será adicionada ao fim da lista. Para inserir um agente, basta preencher os campos da lista e clicar em *Save*. Poderão ser inseridos mais do que um agente de cada vez.

A terceira área é semelhante à área dos agentes, mas apresenta as linhas que estão ligadas ao barramento em questão. Não é possível alterar o Bus I (barramento origem) mas é possível alterar o barramento J (barramento de ligação) e todas as outras características da linha. É, também, possível remover uma linha da mesma forma usada para remover barramentos e adicionar linhas ao barramento, sempre indicando qual é o segundo barramento, caso contrário a linha é descartada.

3.4.2.5 Importar e Exportar redes

A aplicação permite importar e exportar redes para futuros estudos ou apenas para guardar informação. Para importar a rede, os resultados de mercado ou as informações de agentes, é necessário utilizar um *template* pré-definido para o efeito e utilizar a opção correta da barra de menus. Os ficheiros estão descritos em pormenor no subcapítulo 6.3.1.

Após a criação da rede elétrica e da importação dos resultados dos agentes em cada período de negociação, a informação desta aplicação é enviada ao MASCEM, que devolve os resultados de mercado para cada período, sendo esta informação disponibilizada ao utilizador.

A janela, representada na Figura 44, mostra uma rede elétrica representada após os resultados do MASCEM.

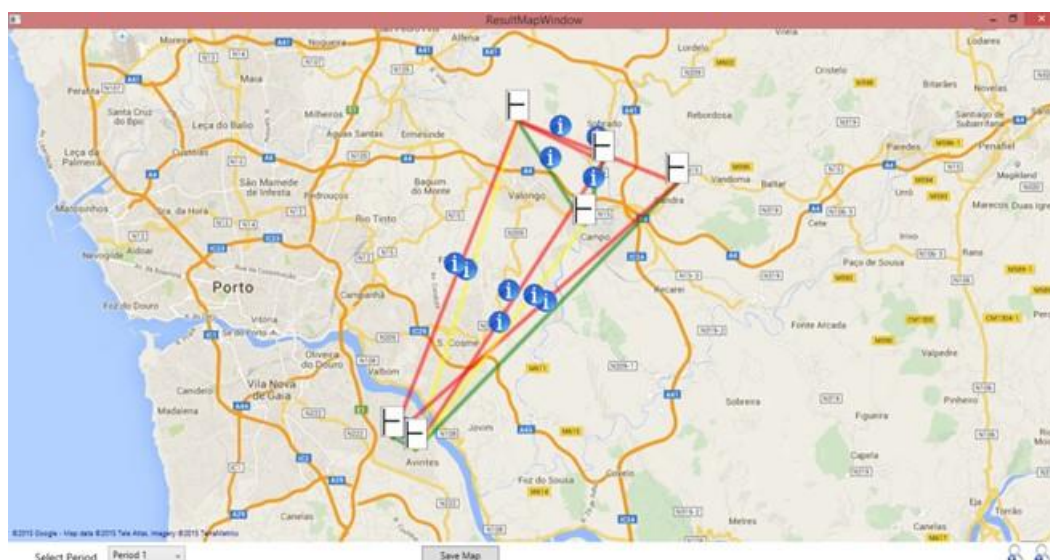


Figura 44 - Janela de resultados

A rede elétrica apresentada na janela de resultados é igual à rede criada ou importada anteriormente, com exceção da cor das linhas. As linhas de transmissão podem ter várias cores, que dependem do cálculo de utilização da linha:

$$\text{Porcentagem} = (S * 100) / C,$$

sendo S o valor de utilização da linha e C a capacidade máxima da linha.

De acordo com o cálculo anterior, é calculada a percentagem de utilização da linha, em ambos os sentidos da corrente. Após este cálculo, é verificada qual a cor que a linha deve ter. As cores possíveis são:

- Cor azul, quando a rede está a ser construída e ainda não reflete resultados do despacho técnico face ao despacho económico fornecido pelo Operador de Mercado, através da ferramenta MASCEM;
- Cor vermelha, caso a percentagem de utilização da linha seja igual a 100% (seja no sentido I-J ou no sentido J-I);
- Cor laranja, caso a percentagem de utilização esteja entre os 60% e os 99%;
- Cor amarela, caso a utilização da linha esteja entre os 30% e os 60%;
- Cor verde, no caso da utilização da linha ser inferior a 30%.

Deste modo, pela simples observação da cor da linha de transmissão, pode ter-se uma ideia de como a rede permite, ou não, a realização das transações resultantes do mercado. Mas esta não é toda a informação disponibilizada. A meio de cada linha de transmissão é criado um novo objeto de informação que contém uma *pop-up* com a informação sobre aquela linha, como indicado na Figura 45.

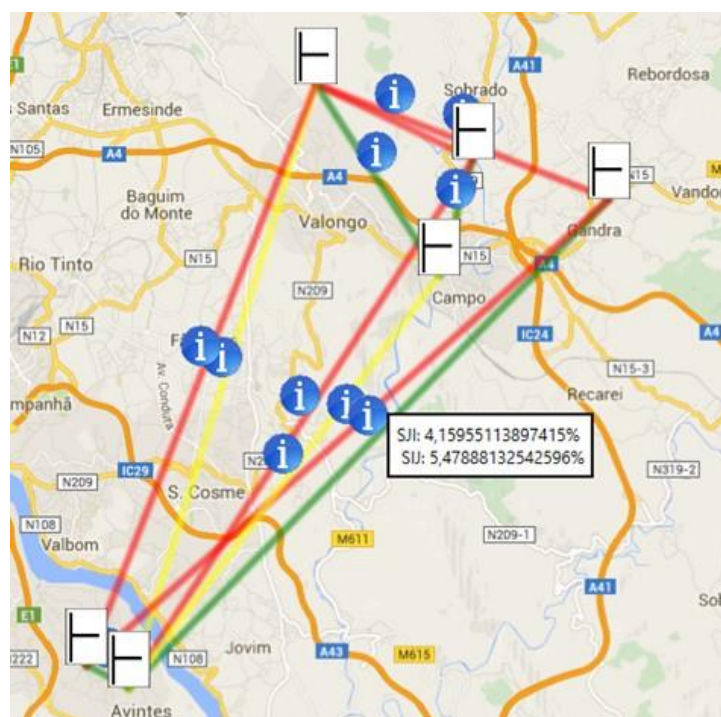


Figura 45 - *Pop-up* de informação do barramento

No entanto, estas informações mudam conforme o período escolhido. Por isso, esta janela permite também navegar entre os períodos simulados em mercado, e visualizar o mapa com as respetivas informações. Na Figura 46 é visível a *combobox* para escolher o período que se pretende estudar.

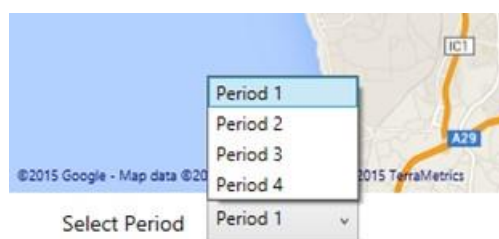


Figura 46 - *Combobox* de escolha de período

A aplicação permite navegar livremente entre períodos, sendo o mapa sempre centrado na rede criada e sem perder informação de cada período. É possível guardar a imagem do mapa, ou seja, tirar um *print screen*, através do botão "Save Map" que é visível na Figura 44, já apresentada.

6.5 Teste de desenvolvimento

De forma a avaliar a qualidade da aplicação, foram efectuados testes de desenvolvimento ao longo da implementação. Os testes realizados foram essenciais para o sucesso de

desenvolvimento da aplicação, funcionalidade a funcionalidade. Sendo assim esta fase consumiu bastante tempo durante a fase de implementação. Os testes consistiram na avaliação de funcionalidade, pelo que foram efetuados após o desenvolvimento de cada uma das funcionalidades da aplicação.

Na Tabela 3 estão descritos os testes efectuados, por funcionalidade. Esta tabela não inclui todos os testes necessários para que a API estivesse funcional e pronta a usar.

Tabela 3 - Descrição dos testes de desenvolvimento

Funcionalidade	Resultado Esperado	Resultado
Pesquisar por coordenadas	Mapa é centrado nas coordenadas geográficas indicadas pelo utilizador.	Mapa centrado com sucesso.
Pesquisar por nome de cidade/aldeia/vila	Mapa é centrado na cidade, aldeia ou vila indicada pelo utilizador.	Mapa centrado com sucesso.
Pesquisar por país	Mapa é centrado no país indicado pelo utilizador.	Mapa centrado com sucesso.
Criar barramento em mapa	Imagem de barramento no local onde o utilizador clicou, no mapa	O barramento não foi criado, pois ocorreu um erro ao atribuir a imagem ao local
Criar barramento em mapa	Imagem de barramento no local onde o utilizador clicou, no mapa	O barramento foi criado com sucesso no mapa.
Eliminar barramento em mapa	A imagem do barramento deve ser eliminada do mapa e os dados do barramento devem ser eliminados da rede.	Barramento eliminado com sucesso da rede, mas não do mapa.
Eliminar barramento em mapa	A imagem do barramento deve ser eliminada do mapa e os dados do barramento devem ser eliminados da rede.	Barramento eliminado com sucesso da rede e do mapa.
Criar barramento em tela	Imagem de barramento no local onde o utilizador clicou, na tela	O barramento foi criado com sucesso na tela.
Eliminar barramento em tela	A imagem do barramento deve ser eliminada da tela e os dados do barramento devem ser eliminados da rede.	Barramento eliminado com sucesso da rede e da tela.
Criar agente em barramento	Deve ser criado um agente que estará visível na janela de edição de barramentos.	Agente criado com sucesso.
Criar linha entre barramentos	Linha deve ligar os barramentos	A linha não foi criada, porque ocorreu um erro ao enviar o segundo barramento.
Criar linha entre barramentos	Linha deve ligar os barramentos	A linha foi criada mas ligeiramente ao lado dos barramentos.

Funcionalidade	Resultado Esperado	Resultado
Criar linha entre barramentos	Linha deve ligar os barramentos	A linha foi criada com sucesso.
Criar novo tipo de Agente	Inserção de linha num ficheiro XML e garantir que a aplicação a lê	Agente criado com sucesso.
Eliminar um tipo de Agente	Eliminar essa linha do ficheiro XML e garantir que não aparece novamente	Agente eliminado com sucesso.
Limpar a rede	A rede deve ser eliminada da interface gráfica e eliminar todos os agentes, barramentos e linhas da rede	Rede eliminada com sucesso.
Edição de barramento – características do barramento	As características principais do barramento devem ser alteradas.	Barramento alterado com sucesso.
Janela de edição de barramento – inserção de agente	O agente deve ser inserido no barramento.	Agente inserido com sucesso.
Edição de barramento – alteração de agente	Os dados do agente devem ser alterados com sucesso, quando o utilizador gravar. Caso cancele, os dados devem permanecer inalterados.	Ocorreu um erro ao cancelar a operação de alteração de agente. Os dados foram alterados.
Janela de edição de barramento – alteração de agente	Os dados do agente devem ser alterados com sucesso, quando o utilizador gravar. Caso cancele, os dados devem permanecer inalterados.	Agente alterado com sucesso quando o utilizador grava e agente inalterado quando utilizador cancela a acção.
Janela de edição de barramento – eliminar agente	O agente deve ser removido do barramento.	Agente eliminado com sucesso.
Janela de edição de barramento – inserção de linha	A linha deve ser criada com sucesso.	Linha criada com sucesso.
Janela de edição de barramento – alteração de linha	Os dados da linha devem ser alterados com sucesso, quando o utilizador gravar. Caso cancele, os dados devem permanecer inalterados.	Ocorreu um erro ao cancelar a operação de alteração de linha. Os dados foram alterados.
Janela de edição de barramento – alteração de linha	Os dados da linha devem ser alterados com sucesso, quando o utilizador gravar. Caso cancele, os dados devem permanecer inalterados.	Agente alterado com sucesso quando o utilizador grava e linha inalterada quando utilizador cancela a acção.
Janela de edição de barramento – eliminar linha	A linha deve ser removida da interface gráfica e da rede.	Linha eliminada com sucesso.

Funcionalidade	Resultado Esperado	Resultado
Importar uma rede através de excel	A rede deve ser criada na interface gráfica	Ocorreu um erro na leitura do excel.
Importar uma rede através de excel	A rede deve ser criada na interface gráfica	A disposição da rede nas áreas geográficas não ficou correcta.
Importar uma rede através de excel	A rede deve ser criada na interface gráfica	As linhas não foram criadas correctamente.
Importar uma rede através de excel	A rede deve ser criada na interface gráfica	Ocorreu um erro quando rede não possui agentes.
Importar uma rede através de excel	A rede deve ser criada na interface gráfica	A rede foi criada com sucesso.
Exportar rede para ficheiro excel	A rede deve ser exportada para o ficheiro excel	A rede foi exportada com sucesso.
Importar resultados de mercado (Despacho Económico)	Os resultados de mercado devem ser importados para a rede.	Os resultados foram importados com sucesso.
Ligação com algoritmos de Power Flow	A ligação com o MATLAB deve ser feita com sucesso e dados devem ser enviados.	Ocorreu um erro ao estabelecer a ligação.
Ligação com algoritmos de Power Flow	A ligação com o MATLAB deve ser feita com sucesso e os dados devem ser enviados.	Ocorreu um erro no envio de dados.
Ligação com algoritmos de Power Flow	A ligação com o MATLAB deve ser feita com sucesso e os dados devem ser enviados.	A ligação foi efectuada e os ficheiros foram criados com sucesso.

7 Casos de Estudo

Para melhor avaliar a solução, neste capítulo serão descritos os casos de estudo efetuados. Cada caso de estudo tem uma rede definida que será descrita numa tabela – cuja estrutura é igual para todos os casos de estudo mas os dados são diferentes -, onde serão mostradas todas as características das linhas que a compõem.

Serão estudados 3 casos de estudo: Rede virtual com 6 barramentos, Produção Distribuída e *Microgrid*. O primeiro, que utiliza uma rede virtual utilizada para testes de desenvolvimento, está dividido em dois cenários, onde a principal diferença são as quantidades de energias transacionadas, com o objetivo de comparar os resultados, considerando diferentes quantidades a serem transportadas na rede. O segundo caso de estudo apresenta uma rede com dados reais e onde existe um agente *prosumer*. O terceiro caso de estudo foi desenvolvido para o artigo científico lançado no âmbito do desenvolvimento desta aplicação, com uma rede de testes IEEE, apresentado no Anexo I.

7.1 Caso de estudo 1 – Rede “virtual” de 6 barramentos

Este caso de estudo ilustra para a mesma rede elétrica, que neste caso é “virtual”, duas situações distintas: uma em que os consumos são baixos, e que estrangulamentos de rede não são esperados, e uma segunda onde os produtores e os consumidores têm produções e consumos maiores, e onde a existência de estrangulamentos é mais provável.

A rede elétrica usada neste caso é fictícia, usada para testes, no entanto todos os dados de consumidores e de produtores são reais, referentes a 8 agentes: um agente *prosumer* o que significa que pode comprar e vender, 3 compradores e 4 vendedores. A Tabela 4 mostra as características de cada uma das 11 linhas de transmissão da rede.

A primeira e segunda coluna de cada tabela representam os barramentos ligados pela linha de transmissão em questão; a terceira coluna (R p.u.) representa a resistência da linha; a quarta coluna (X p.u.) representa a impedância indutiva; a quinta coluna (B p.u.) representa a impedância capacitiva e a última coluna (Smax p.i) representa a capacidade máxima da linha.

Tabela 4 - Características das linhas de transmissão

Bus I	Bus J	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,1	0,2	0,04	40
1	4	0,05	0,2	0,04	60
1	5	0,08	0,3	0,06	40
2	3	0,05	0,25	0,06	40
2	4	0,05	0,1	0,02	60
2	5	0,1	0,3	0,04	30
2	6	0,07	0,2	0,05	90
3	5	0,12	0,26	0,05	70
3	6	0,02	0,1	0,02	80
4	5	0,2	0,4	0,08	20
5	6	0,1	0,3	0,06	40

Na Figura 47, está representada a rede elétrica já criada na aplicação. O identificador de cada barramento está representado ao lado, ou por cima da imagem do barramento.

Os agentes estão posicionados, na rede, da seguinte forma:

- Agentes 1 (comprador), 2 e 3 (vendedores) estão posicionados no barramento 1;
- Agente 4 (comprador) está posicionado no barramento 2;
- Agentes 5 (comprador) e 6 (vendedor) estão posicionados no barramento 4;
- Agente 7 (vendedor) está posicionado no barramento 5;
- Agente 8 (*prosumer*) está posicionado no barramento 6.

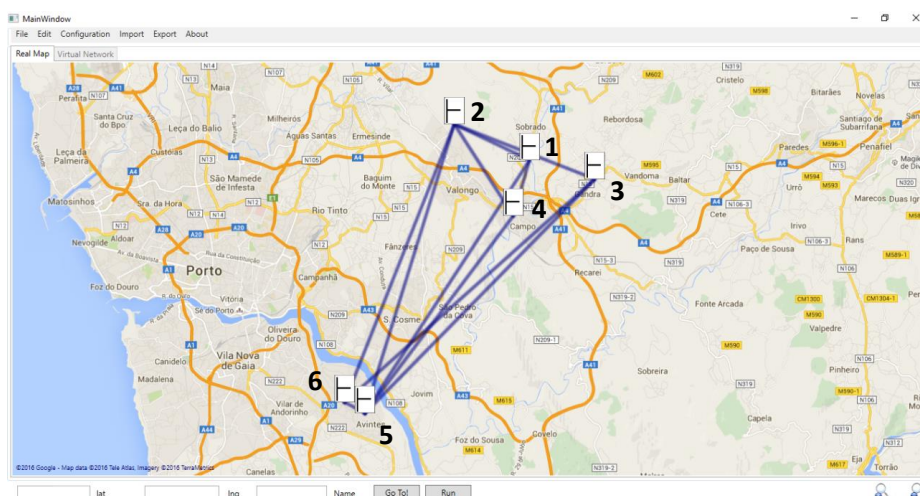


Figura 47 - Visualização da Rede

7.1.1 Cenário 1

Os vendedores representam produtores de energias renováveis: 2 solares e 2 eólicos. O *prosumer* é uma casa com painel solar, o que indica que irá vender energia durante o dia e comprar energia durante a noite. Os compradores representam edifícios residenciais.

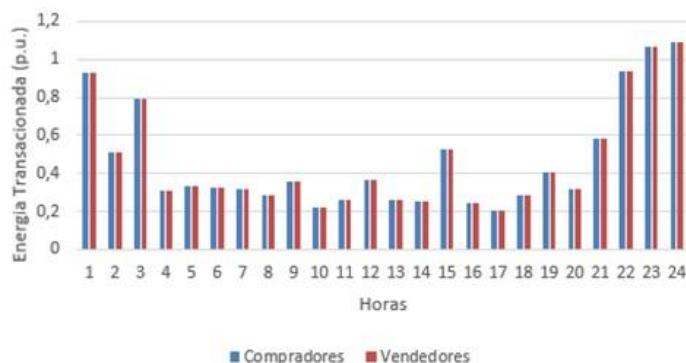


Figura 48 - Resultados do Mercado

O mercado interno resultou num balanço entre a geração e consumo de energia, como é possível verificar na Figura 48: os valores são iguais para cada hora do dia. As horas de maior consumo são à noite, no entanto os valores são muito pequenos. Consequentemente, a venda também tem valores superiores durante a noite.

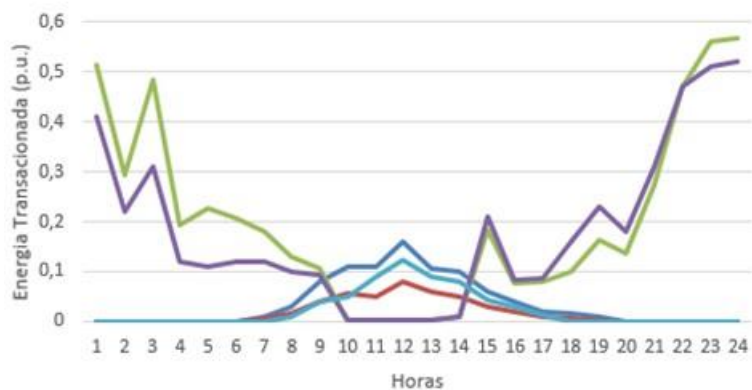


Figura 49 - Perfil de vendedores

O gráfico da Figura 49 representa o perfil dos vendedores em cada hora do dia. São distinguíveis duas linhas: as eólicas, representadas a verde e roxo, cuja produção também é influenciada pelas condições atmosféricas. As restantes linhas, como são produtores solares, têm maior produção durante o dia.

O gráfico da Figura 50 representa o perfil de compradores durante cada do hora do dia, onde é possível identificar maior consumo durante a noite.

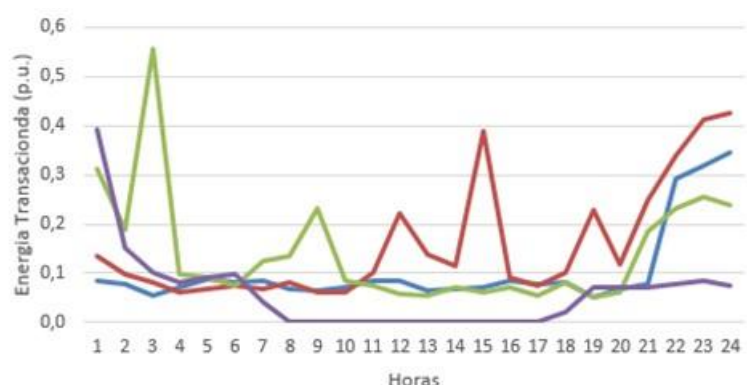


Figura 50 - Perfil de compradores

Após a análise e criação da rede, foi executado o algoritmo de *Power Flow*, de acordo com os dados das transações do mercado. Esses dados indicam se existiu algum congestionamento da rede e são visíveis na aplicação. A Tabela 5 indica os dados resultantes das linhas de transmissão do *power flow*. As primeiras duas colunas indicam os barramentos ligados pela linha de transmissão, as duas seguintes indicam a quantidade de energia que passará pela linha no período em questão, em ambos os sentidos e a última coluna é a capacidade máxima da linha, já indicada na coluna Smax da Tabela 4. A Tabela 5 refere-se ao 5º período.

Tabela 5 - Dados das linhas de transmissão para o 5º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u)	Direction j-i S (p.u)	Smax (p.u.)
1	2	0,71015	3,54718	40
1	4	4,71748	8,65359	60
1	5	4,132571	2,059699	40
2	3	2,895427	3,24369	40
2	4	8,364194	10,2931	60
2	5	4,157134	0,073401	30
2	6	2,18645	7,184339	90
3	5	5,086393	0,029888	70
3	6	8,321958	10,2544	80
4	5	7,799548	0,412676	20
5	6	2,225515	8,237793	40

A partir destes dados pode-se concluir que a aplicação não mostrará congestionamentos na rede, uma vez que nenhuma linha tem, em nenhuma das direções, uma quantidade de energia acima que aquela que pode transmitir.

Na Figura 51 está representado o estado de congestionamento das linhas de acordo com as transações de mercado para o 5º período.



Figura 51 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 5º período

Dada a pouca quantidade de energia transacionada, apenas a linha que liga os barramentos 4 e 5 apresenta uma percentagem de uso superior a 30%, estando por isso realçada a cor amarela.

O mesmo teste foi feito para o 10º período. A Tabela 6 indica os dados do MASCEM para esse período.

Tabela 6 - Dados das linhas de transmissão para o 10º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,71891784	3,544504	40
1	4	4,71712683	8,653309	60
1	5	4,13460184	2,058971	40
2	3	2,89637563	3,240956	40
2	4	8,37024271	10,29926	60
2	5	4,15735586	0,073595	30
2	6	2,18059811	7,17734	90
3	5	5,08300218	0,037994	70
3	6	8,31607451	10,2487	80
4	5	7,80125338	0,408296	20
5	6	2,22117356	8,233263	40

Tal como no 5º período, apenas uma linha tem uma utilização superior a 30%. É a linha com menos capacidade (20 p.u.). Na Figura 52 está a representação visual da rede após receber os

dados dos algoritmos de *Power Flow*, para este período. É muito semelhante à do 5º período, modificando apenas as percentagens de utilização de linhas, algo que não é visível na figura.



Figura 52 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 5º período

Foi feito, ainda, o mesmo teste para o período 24, que é o período onde a maior quantidade de energia é transacionada. No entanto, visivelmente, não é diferente dos períodos anteriores com nova exceção para as percentagens de uso de linha, que variam ligeiramente. A Tabela 7 apresenta os dados para o 24º período.

Tabela 7 - Dados das linhas de transmissão para o 24º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,704998	3,527857	40
1	4	4,645697	8,574275	60
1	5	4,125551	2,04702	40
2	3	2,927579	3,220847	40
2	4	8,264891	10,19712	60
2	5	4,135956	0,096998	30
2	6	2,120211	7,121705	90
3	5	5,037326	0,112158	70
3	6	8,24377	10,17752	80
4	5	7,753061	0,471165	20
5	6	2,165038	8,176235	40

Tal como nos períodos anteriores, a linha com maior percentagem de uso é a que une os barramentos 4 e 5. A Figura 53 segue mostra a rede, após receber os dados do MASCEM e analisar os resultados do cálculo do trânsito de potências.

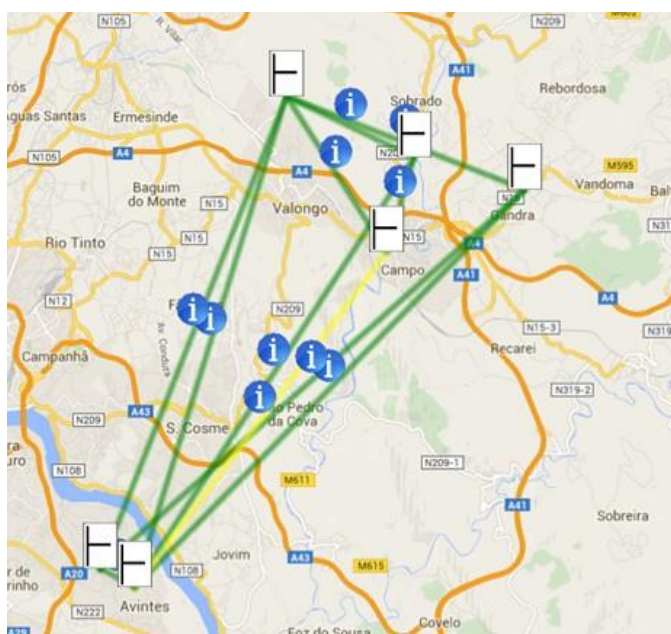


Figura 53 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 5º período

Não existem grandes variações de resultados porque esta rede de transmissão tem muita capacidade, sendo a linha dos barramentos 4 e 5 aquela cuja capacidade é muito inferior às restantes.

7.1.2 Cenário 2

Para este caso de estudo foram efetuadas alterações aos consumos dos agentes, na compra e venda: os produtores representam, agora, parques solares e parques eólicos e os consumidores representam edifícios comerciais. No entanto, a disposição da rede, no mapa, mantém-se igual à Figura 47, sendo a única diferença os valores de consumo e produção.

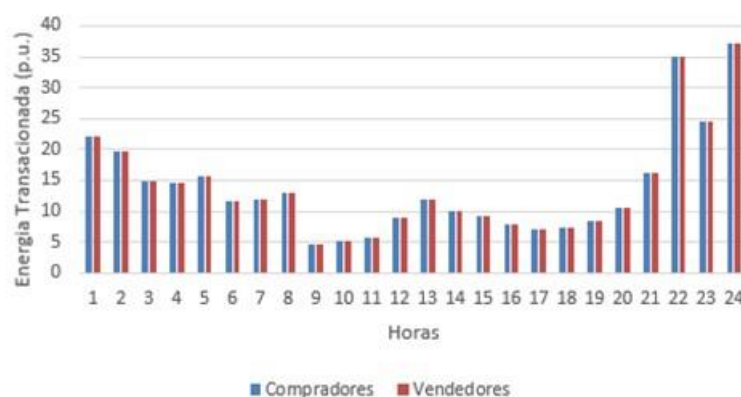


Figura 54 - Resultados de Mercado

Através da análise da Figura 54 é possível concluir que o mercado interno resultou num balanço entre a geração e consumo de energia. As horas de maior consumo são à noite, dado serem edifícios comerciais e, conseqüentemente, a venda também tem valores superiores durante a noite.

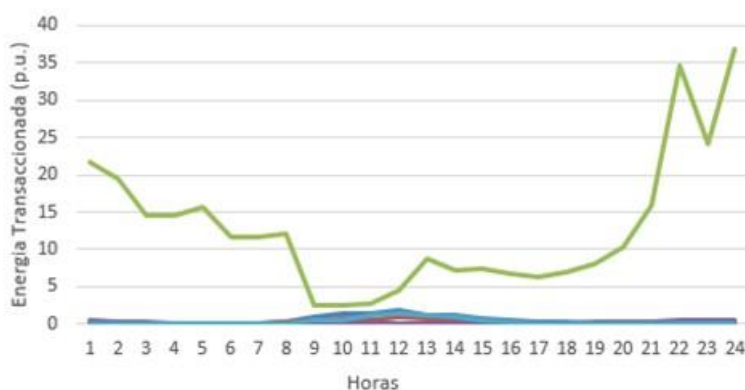


Figura 55 - Perfil dos vendedores

A Figura 55 representa o perfil de geração de cada agente vendedor, ao longo do dia. Destaca-se um agente, que é uma eólica. O vendedor que se destaca na figura anterior é um parque eólico. No entanto, os restantes vendedores geram uma quantidade pequena de energia.

A Figura 56 representa o perfil de consumo de cada agente comprador, ao longo do dia. Apesar de, individualmente, terem um perfil de consumo superior aos perfis de venda, não deverão existir problemas na rede uma vez que as linhas têm uma grande capacidade.

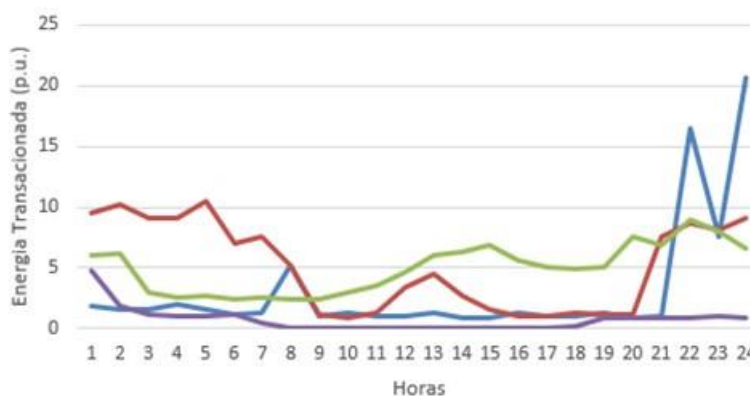


Figura 56 - Perfil dos compradores

Devido aos resultados da primeira parte deste caso de estudo, para esta simulação foi escolhido o 9º período por ser aquele com maior quantidade de energia transacionada. Os resultados da energia transacionada em cada linha de transmissão, estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados das linhas de transmissão para o 9º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	1,099315025	3,302064991	40
1	4	4,199000388	8,153866398	60
1	5	4,34246806	1,867194267	40
2	3	3,02593924	3,136614681	40
2	4	7,965154845	9,903543434	60
2	5	4,189059534	0,141449112	30
2	6	1,981077755	6,985332584	90
3	5	5,029796242	0,080975101	70
3	6	8,148925939	10,08330482	80
4	5	7,716212352	0,47102558	20
5	6	2,123788873	8,137732646	40

A Figura 57 mostra a rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow*. Tal como na primeira parte do caso de estudo, a única linha com maior percentagem de capacidade usada é a linha que liga os barramentos 4 e 5, enquanto as restantes apresentam menos de 30% de uso da sua capacidade total.



Figura 57 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 9º período

Tal como referido na primeira parte deste caso de estudo, esta rede é de transmissão com muita capacidade e é difícil atingir os seus limites, mesmo utilizando prédios no lugar de casas e parques eólicos no lugar de turbinas.

Para efeitos de demonstração, os dados de compra e venda para o 24º período foram multiplicados por 10, estando descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados alterados das linhas de transmissão para o 24º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	56,1387525	63,22674871	40
1	4	123,7046852	153,3566951	60
1	5	45,15948394	49,88202221	40
2	3	22,41306132	18,24045745	40
2	4	141,167285	153,9180707	60
2	5	6,708483434	3,715076733	30
2	6	38,76390477	37,551235	90
3	5	10,81973749	14,84447613	70
3	6	29,01510073	27,9175275	80
4	5	36,7975664	33,99109501	20
5	6	22,71598198	18,52094856	40

Desta forma, foi possível simular congestionamentos na rede, em 5 das 11 linhas. A Figura 58 mostra a representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow*.

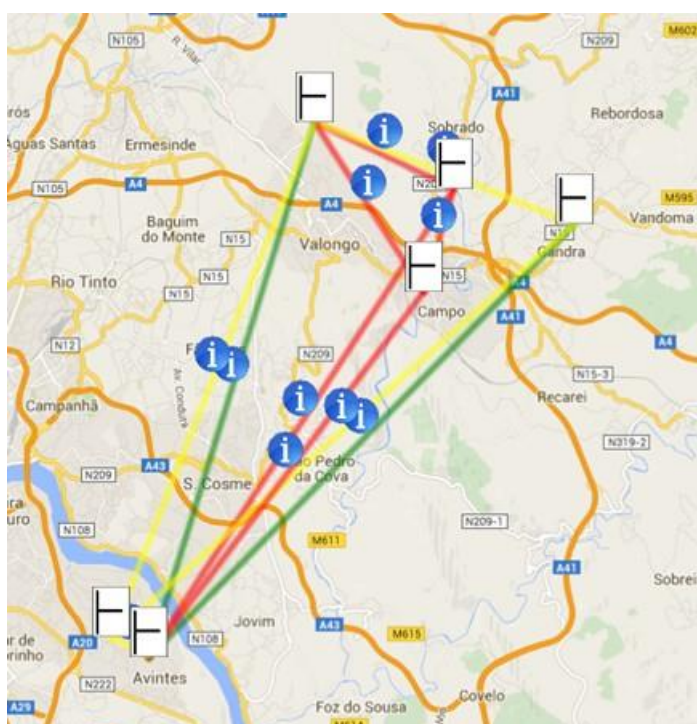


Figura 58 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow*

A aplicação representa 5 linhas com cor vermelha, o que significa que é usada mais de 100% da sua capacidade (existe congestão na linha), 3 amarelas o que significa que foi usada entre 30 e 60% e ainda duas verdes, que indica que a percentagem usada é inferior a 30%.

7.2 Caso de estudo 2 – Produção Distribuída

A rede usada para o segundo caso de estudo contém 14 barramentos e 20 agentes: 10 compradores que representam edifícios comerciais, 1 *prosumer* que representa um edifício com vários painéis solares e 9 vendedores que representam parque eólicos e parques solares. Na Tabela 10 estão descritas as características das linhas de transmissão da rede em questão. Os dados são reais, no entanto, a localização dos barramentos e agentes é fictícia.

Tabela 10 - Características das linhas de transmissão

Bus I	Bus J	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	1
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	10
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	5
2	4	0,05811	0,17632	0,034	10
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	1
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	10
4	5	0,01335	0,04211	0	10
4	7	0	0,20912	0	11
4	9	0	0,55618	0	10
5	6	0	0,25202	0	10
6	11	0,09498	0,1989	0	10
6	12	0,12291	0,25581	0	10
6	13	0,06615	0,13027	0	10
7	8	0	0,17615	0	10
7	9	0	0,11001	0	10
9	10	0,03181	0,0845	0	10
9	14	0,12711	0,27038	0	10
10	11	0,08205	0,19207	0	10
12	13	0,22092	0,19988	0	10
13	14	0,17093	0,34802	0	5

A configuração da rede, no mapa, está ilustrada na Figura 59.

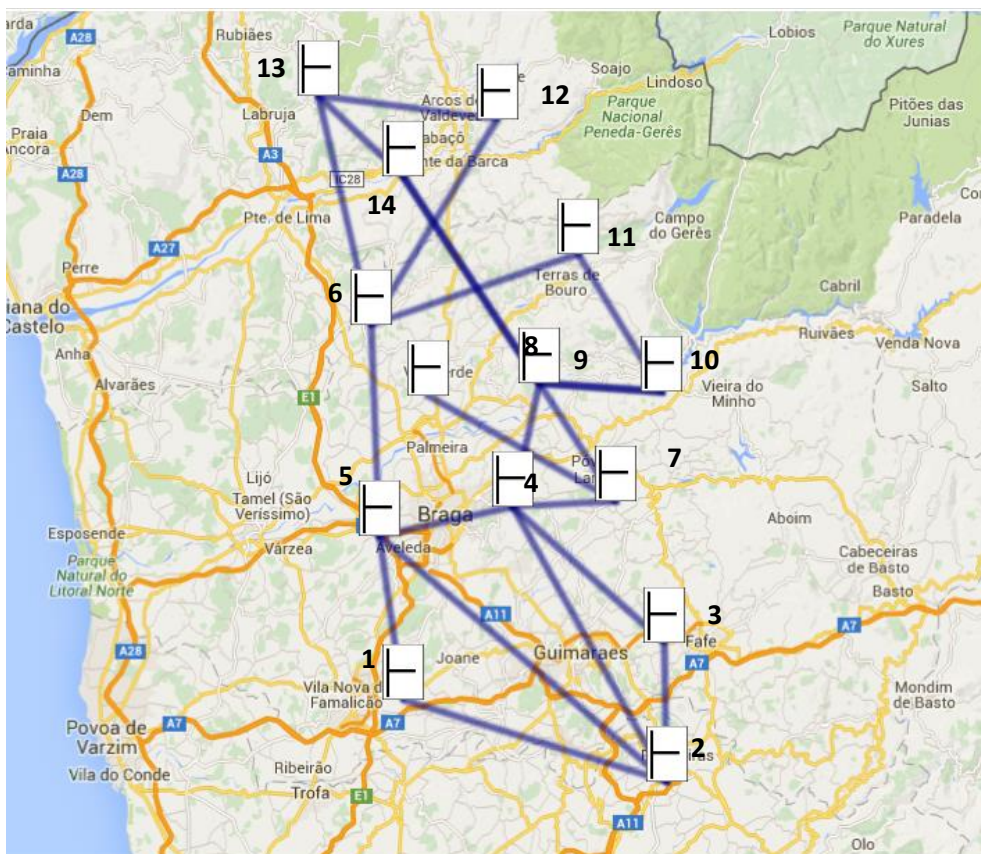


Figura 59 - Representação visual da rede

A posição dos agentes, na rede, é a seguinte:

- Agente 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (comprador) estão posicionados, respetivamente, nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6;
- Agente 7 (comprador) está posicionado no barramento 8;
- Agente 8 (comprador) está posicionado no barramento 9;
- Agente 9 (comprador) está posicionado no barramento 10;
- Agentes 10 (*prosumer*), 11, 12, 13, 14 e 15 (vendedores) estão posicionados no barramento 11;
- Agentes 16 e 17 (vendedores) estão posicionados no barramento 12;
- Agente 18 (vendedor) está posicionado no barramento 13;
- Agentes 19 e 20 (vendedores) estão posicionado no barramento 14.

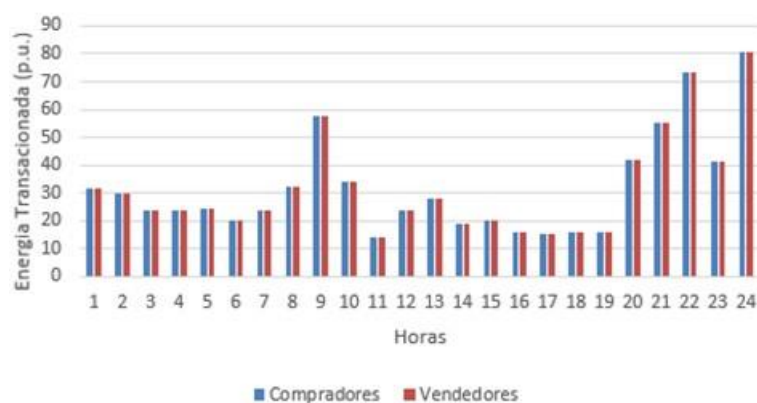


Figura 60 - Resultados de Mercado

Mais uma vez, é possível observar na Figura 60 que o mercado interno resultou num balanço entre a geração e a compra de energia elétrica. Os períodos com maior consumo e venda são à noite, com exceção para o período das 9 horas da manhã, que conta com valores elevados, dado serem edifícios comerciais. É possível, desde já, concluir que tendo em conta a capacidade máxima que as linhas suportam (S_{max}) e tendo em conta os valores de produção e consumo, em alguns períodos existirão estrangulamentos na rede.

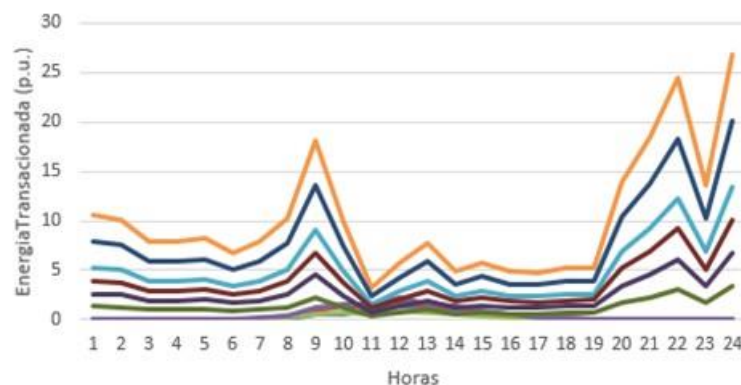


Figura 61 - Perfil dos vendedores

No gráfico de perfil de vendedores representado na Figura 61, é possível verificar que os períodos com maior quantidade de energia vendida são os períodos das 20h até às 24h, e o período das 9h.

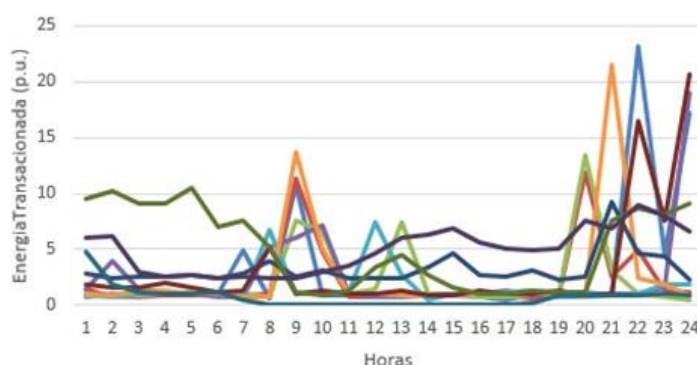


Figura 62 - Perfil dos compradores

O gráfico de perfil de compradores representado na Figura 62 indica que os valores se encontram semelhantes ao gráfico de perfil de vendedores, representado na Figura 61. Existem os mesmos “picos” de transação de energia às 9h e das 20h às 24h. No entanto, é notório que alguns compradores não seguem esses valores, tendo um valor quase linear ao longo do dia.

Analisando os resultados para o 11º período, onde foi transacionada menos energia, os resultados obtidos pelo MASCEM estão representados na Tabela 11. Novamente, as primeiras colunas indicam os barramentos que são ligados pelas linhas, a coluna Direction i-j e Direction j-i indicam a quantidade de energia que circula em cada direção e a última coluna indica a capacidade máxima da linha.

Tabela 11 - Dados das linhas de transmissão para o 11º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	1,538428	3,755422	1
1	5	1,205831	5,981827	10
2	3	1,336355	2,993025	5
2	4	2,530286	5,832103	10
2	5	2,424768	5,757881	1
3	4	2,71572	3,925869	10
4	5	1,037806	1,038222	10
4	7	6,516978	6,529701	11
4	9	3,6558	3,676917	10
5	6	10,87117	10,96212	10
6	11	9,063201	9,061997	10
6	12	1,268697	1,268528	10
6	13	0,621179	0,621097	10
7	8	2,629646	2,618181	10
7	9	6,457672	6,48232	10
9	10	5,16358	5,164157	10
9	14	0,950388	0,95309	10
10	11	10,42644	10,45491	10
12	13	0,906229	0,906229	10
13	14	1,95323	1,95323	5

Após a verificação dos dados, apura-se que existem problemas em 4 linhas, pelo que a aplicação deve identificar constrangimentos nessas mesmas linhas.

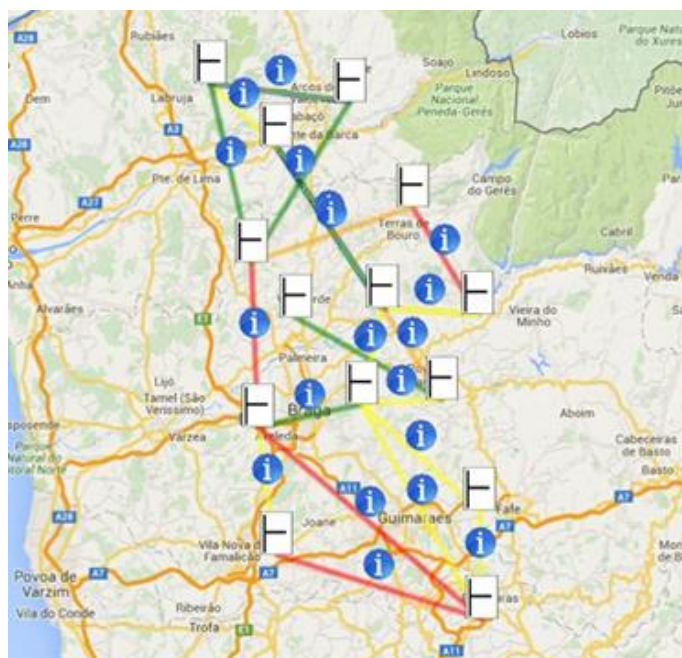


Figura 63 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 11º período

A Figura 63 representa a rede, no 11º período, após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow*. Como pode ser observado, existem 4 linhas com a cor vermelha, o que significa que não conseguem suportar a quantidade de energia transacionada neste período.

O mesmo teste foi efetuado para o 24º período, onde a energia transacionada foi a máxima para o dia em questão. O resultado do MASCEM está descrito na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados das linhas de transmissão para o 24º período

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	11,47674	10,08656	1
1	5	7,457118	8,084861	10
2	3	2,69226	2,073649	5
2	4	3,617106	4,447661	10
2	5	6,01875	6,845928	1
3	4	2,382043	3,041889	10
4	5	10,03811	10,08481	10
4	7	9,706649	9,933747	11
4	9	6,052888	6,287565	10
5	6	26,42609	28,463	10

Bus I	Bus J	Direction i-j S (p.u.)	Direction j-i S (p.u.)	Smax (p.u.)
6	11	49,57309	50,48381	10
6	12	7,736001	7,87812	10
6	13	28,23898	28,75776	10
7	8	2,50515	2,493245	10
7	9	12,43503	12,62185	10
9	10	27,44676	27,61354	10
9	14	27,44676	27,61354	10
10	11	30,64703	32,51158	10
12	13	30,64703	32,51158	10
13	14	58,07691	61,23817	5

Através dos dados do MASCEM, concluiu-se que grande parte das linhas de transmissão não suportam a quantidade de energia resultante das transações do mercado: 12 em 20 apresentam constrangimentos, apresentadas na Tabela 12. A Figura 64 mostra a rede após receber os resultados dos algoritmos de *Power Flow*.



Figura 64 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 24º período

7.3 Caso de estudo 3 – *Microgrid* com dados reais

Este caso de estudo foi divulgado no artigo científico publicado no âmbito deste projeto [39]. A *smart grid* usada neste caso de teste é a rede de teste IEEE com 14 barramentos, no entanto a localização dos barramentos é fictícia. A Tabela 13 mostra as características das 20 linhas de transmissão consideradas.

Tabela 13 - Características das linhas de transmissão

Bus I	Bus J	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	5
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	10
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	5
2	4	0,05811	0,17632	0,034	10
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	10
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	10
4	5	0,01335	0,04211	0	10
4	7	0	0,20912	0	11
4	9	0	0,55618	0	10
5	6	0	0,25202	0	10
6	11	0,09498	0,1989	0	10
6	12	0,12291	0,25581	0	10
6	13	0,06615	0,13027	0	10
7	8	0	0,17615	0	10
7	9	0	0,11001	0	10
9	10	0,03181	0,0845	0	10
9	14	0,12711	0,27038	0	10
10	11	0,08205	0,19207	0	5
12	13	0,22092	0,19988	0	5
13	14	0,17093	0,34802	0	5

A *smart grid* acomoda geração distribuída (fotovoltaica e carvão) que provém de 22 produtores: 17 produtores com base em energia solar; 5 produtores de energia proveniente de carvão e 82 consumidores (8 casas, 8 edifícios residenciais, cada um com 8 apartamentos, com espaço comum e 2 edifícios comerciais: um bar (que funciona durante a noite) e uma lavanderia *self-service*).

O mercado interno da *smart grid* é simulado no MASCEM, incluindo as licitações de compra e de venda de todos os agentes, para cada período de uma hora do dia 21 de Janeiro de 2015. A Figura 65 representa o total de energia transacionada em cada hora do dia, resultante da execução do Mercado no dia simulado.



Figura 65 - Resultados do Mercado

Do gráfico representado na Figura 65 conclui-se que, para cada hora do dia existe uma igualdade de valores entre a geração e consumo de energia e que as horas com mais energia transacionada pertencem ao horário noturno. Na Figura 66, verifica-se que os consumos de energia por parte dos edifícios comerciais são elevados.

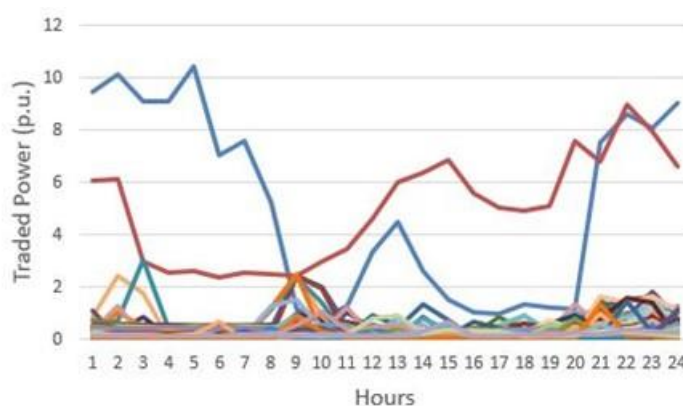


Figura 66 - Perfis de consumidores

A Figura 66 indica os perfis de consumidores, para cada hora do dia. É possível distinguir que o total de consumo dos dois edifícios comerciais é muito maior que os edifícios residenciais. A linha vermelha representa a lavandaria e a linha azul representa o bar, o que permite identificar que o maior consumo de energia é feito à noite, enquanto os consumidores residenciais apresentam perfis semelhantes.

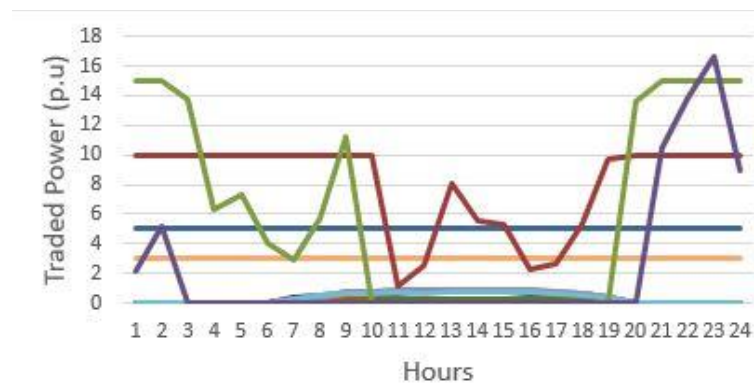


Figura 67 - Perfis de geração

A Figura 67 mostra o perfil de cada agente produtor. Os produtores de energia solar apresentam valores semelhantes. Como dependem da intensidade solar, atingem um valor mais alto durante as horas do dia em que o sol está mais intenso e não produzem à noite. Por outro lado, a quantidade vendida pelos produtores de energia derivada do carvão, varia ao longo do dia. A geração máxima destes 5 produtores é de 3, 5, 10, 15 e 17 e os preços são mais baixos para os produtores com menos capacidade. Isto significa que para satisfazer a procura, os produtores com menos capacidade são usados primeiro, e os maiores são apenas usados quando a quantidade de energia necessária aumenta. Por esta razão, na figura anterior, a linha roxa e verde (os maiores produtores) não vendem nenhuma energia durante algumas horas do dia.

Para analisar os resultados, foram escolhidos dois períodos de análise: a hora 11 e a hora 23 que correspondem, respetivamente, aos períodos com menor e maior quantidade de energia transacionada.

Após análise dos algoritmos de *Power Flow*, é disponibilizada a rede com os consumos nas linhas, para cada hora do dia. Na Figura 68, está representado o 11º período.



Figura 68 - Representação visual da rede após receber os dados dos algoritmos de *Power Flow* do 11º período

A Figura 69 é referente ao 23º período.



Pode-se observar que 5 de 20 linhas apresentam problemas, estando destacadas com a cor vermelha: a quantidade de energia transacionada é mais do que a linha consegue suportar. O Operador de Mercado do MASCEM pode usar o feedback da aplicação para validar e fechar a sessão ou então reexecutar o Mercado de forma a chegar a uma solução que respeite os limites físicos da rede elétrica.

8 Conclusão e Perspetivas de Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido foca-se no apoio ao estudo e simulação de redes e mercados elétricos e na sua interação. Neste sentido, foi necessário estudar um tema que era desconhecido à autora e fazer o levantamento do estado da arte referente a trabalhos relacionados com o tema.

Sendo esta aplicação utilizada para criação e visualização de redes elétricas, uma das preocupações fundamentais no seu desenvolvimento verificou-se a nível da interface gráfica, para que esta fosse apelativa e intuitiva.

Neste último capítulo são apresentados os objetivos alcançados, e são ainda referidas as eventuais limitações e as perspetivas de trabalho futuro. Para finalizar, é apresentada uma apreciação final de todo o trabalho realizado.

8.1 Contributos

Para dar início a este projeto, foi necessário estudar vários temas: sistemas elétricos, redes elétricas e os seus constituintes. Foi, ainda, necessário fazer um estado de arte sobre aplicações semelhantes e, por isso, aprender a usá-las para melhor as perceber. Estes dois pontos representaram um grande desafio pois o tema e as aplicações como o *PowerWorld*, nunca tinham sido estudados e utilizados até então.

Um dos principais objetivos deste projeto era a possibilidade de desenhar redes elétricas num mapa o que levou à necessidade de estudo e experimentação de API's que permitissem geolocalização. Foi ainda necessário experimentar e perceber como seria a melhor disposição de elementos para a interface gráfica para o projeto.

Para avaliar a eficiência e eficácia da solução proposta, foram realizados casos de estudo com dados reais para avaliar a veracidade da informação que a aplicação disponibilizava. Os casos de estudo foram uma forma bastante segura de verificar que a aplicação estava a calcular e a mostrar todos os dados correctamente, sendo possível validar que não existiam erros na sua concepção.

A aplicação criada no âmbito deste projecto permite a criação de redes elétricas com barramentos, agentes e linhas de transmissão de modo a permitir a criação, simulação e análise, tanto de redes reais como de redes virtuais.

Foram desenvolvidos os meios para que o utilizador possa definir uma nova rede, através da apresentação de um mapa real ou virtual, utilizando a API GMaps.net que permitiu uma manipulação poderosa de mapas. Deste modo, o trabalho desenvolvido permite a criação de novos cenários, e experimentação de casos reais ou adaptações experimentais, como as redes de testes IEEE. Permite a inclusão de agentes MASCEM na sua rede elétrica, possibilitando uma ligação com o MASCEM de forma a obter simulações mais completas, que dotam este simulador com uma maior flexibilidade e capacidade de análise técnica das linhas, além dos estudos já permitidos anteriormente. A aplicação comunica também com algoritmos de *Power Flow* verificando se as transações no mercado de energia elétrica estão de acordo com os limites técnicos da rede, permitindo, desta forma, um melhor apoio à decisão. É possível utilizar a aplicação de forma individual, através das funcionalidades, muito úteis para testes, de importação e exportação de ficheiros *excel*: pode ser exportada e importada uma rede elétrica, podem ser importados os resultados de mercado e os resultados dos algoritmos de *Power Flow*.

Foi garantida a interação amigável com o utilizador, permitindo que o mesmo seja capaz de consultar facilmente o estado das linhas da rede simulada. Isto foi conseguido através da representação das linhas através de cores distintas e intuitivas, que permitem uma rápida visualização das linhas que estão congestionadas ou em risco, em cada momento, podendo verificar a percentagem exata utilizada da linha através de um marcador informativo criado na linha. O trabalho desenvolvido permite a criação de novos cenários, e experimentação de casos reais ou adaptações experimentais.

O trabalho desenvolvido deu origem à criação de um novo agente no MASCEM: o agente Operador de Rede, apresentado na conferência PAAMS, no presente ano. Foi criado incorporando o trabalho desenvolvido nesta dissertação, e permitindo a interação com a sociedade de agentes do MASCEM, fazendo deste sistema um sistema mais completo e garantindo a comunicação e interação com os outros agentes, já existentes, do MASCEM.

Por fim, concluiu-se que os objetivos estabelecidos no início do projeto foram alcançados.

8.2 Limitações e Trabalho Futuro

O objetivo principal deste trabalho foi alcançado com sucesso. No entanto, a aplicação descrita nesta dissertação apresenta algumas limitações e oportunidades de evolução. Apenas os testes

finais, onde foi necessário criar redes muito grandes, maiores do que as usadas nos testes até então, permitiram verificar algumas ações que seriam benéficas mas não estão presentes na aplicação.

8.2.1 Undo/Redo

Neste momento a aplicação não permite as ações de undo/redo. No entanto, é notório que serão vantajosas numa aplicação como esta, onde facilmente uma rede chega aos 100 elementos.

8.2.2 Arrastar elementos

Ainda que seja bastante fácil a criação e eliminação de elementos, seria vantajoso, e pouparia algum tempo, a possibilidade de arrastar elementos no mapa, reposicionando-os.

8.2.3 Nomes dos elementos visíveis

Com redes muito grandes torna-se difícil seguir todos os elementos criados. Por isso, poderá ser vantajoso conseguir colocar o nome de cada barramento e os agentes que lhe estão associados visíveis, sem ser necessário visualizar a sua *pop-up*.

8.3 Apreciação Final

Este projeto foi extremamente gratificante a nível pessoal, dado que permitiu adquirir e consolidar bastantes conhecimentos, quer a nível tecnológico, uma vez que foi necessário aprender algo novo, em que a autora nunca tinha trabalhado antes, como a nível pedagógico, pela aprendizagem sobre redes elétricas e sistemas elétricos. A área de sistemas elétricos era completamente desconhecida, por isso foi um grande desafio e foi concluído com sucesso.

O desenvolvimento da aplicação permitiu enriquecer capacidades que se referem ao desenvolvimento de *software* e *design*.

A autora ficou bastante satisfeita com os resultados obtidos, não só pelo desenvolvimento da aplicação mas também com o entusiasmo e curiosidade demonstradas pela audiência na apresentação do artigo científico apresentado no presente ano na conferência PAAMS, na Universidade de Sevilha sobre este trabalho. Desta forma, fica o desejo de ver esta aplicação evoluir e tornar-se uma aplicação de trabalho diário no GECAD, cumprindo assim o objetivo com que foi concebida.

Referências

- [1] EDP [Online] Available: <http://www.edp.pt/pt/particulares/informacoesuteis/Pages/ALiberalizacao.aspx> [Acedido até Abril 2015]
- [2] [Shannon & Johannes, 1976]- Shannon, Robert ; Johannes, James D., "*Systems Simulation: The Art and Science*"
- [3] Soares, J. e Sousa, T., "*Técnicas para a Resolução do Trânsito de Potência em Sistemas Elétricos de Energia: Estado de arte*", Relatório Interno do GECAD
- [4] REN [Online] Available: http://www.ren.pt/pt-PT/o_que_fazemos/eletricidade/ / [Acedido até Abril 2015]
- [5] EDP [Online] Available: <http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/sistemaelectricoportugues/Pages/SistElectNacional.aspx> [Acedido até Abril 2015]
- [6] Mehnaz, N., Bhuiyan, A.I. ; Roy, M. ; Hossain, F. "*Load Flow Analysis And Abnormality Removal Of Bangladesh Power System Using Software Cyme*", 2013
- [7] "*Eletricidade para Todos*" [Online] Available: http://www.cfn.ist.utl.pt/conf_energia/files/DB_1_Energ.%20presente%20%20futuro.pdf [Acedido até Abril 2015]
- [8] Hesse, M. H., "Electromagnetic and Electrostatic Transmission-Line Parameters by Digital Computer". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 82, Issue 66, June 1963.
- [9] Power World [Online] Available: <http://www.powerworld.com> [Acedido até Abril 2015]
- [10] Power World [Online]. Available: <http://www.powerworld.com/products/simulator/overview> [Acedido até Abril 2015]
- [11] Ahmad Awais, Power World, "*Introduction to PowerWorld Simulator*" [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=2Gy6vT9fDk0> [Acedido até Abril 2015]
- [12] CYME Software [Online]. Available: <http://www.cyme.com/software/cymecymflow/> [Acedido até Abril 2015]
- [13] I. Praça et al., "*MASCEM: A Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets*". IEEE Intelligent Systems, vol. 18, no. 6, pp. 54–60, 2003
- [14] T. Pinto et al., "*A new approach for multi-agent coalition formation and management in the scope of electricity markets*". Energy Journal, doi:10.1016/j.energy.2011.05.045, 2011.
- [15] Vale, Z., Pinto, T. ; Praca, I. ; Morais, H., "*Mascem: Electricity Markets Simulation with Strategic Agents*"
- [16] POWERWEB [Online]. Available: <http://www.pserc.cornell.edu/powerweb/> [Acedido até Abril 2015]

- [17] Maenhoudt, M. , Deconinck, G. , *“Agent-Based Modelling as a Tool for Testing Electric Power Market Designs”*, Energy Market (EEM), 2010 7th International Conference on the European, 2010
- [18] Conzelmann, G. ,Boyd, G. ; Koritarov, V. ; Veselka, T., *“Multi-Agent Power Market Simulation using EMCAS”*, Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005
- [19] Thimmapuram, P. Veselka, T.D. ; Koritarov, V. ; Vilela, S. ; Pereira, R. ; Silva, R.F, *“Modeling Hydro Power Plants in Deregulated Electricity Markets: Integration and Application of EMCAS and VALORAGUA”*, Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on European, 2008
- [20] Paulo Trigo, Paulo Marques, Helder Coelho, *“(Virtual) Agents for running electricity markets”*, Simulation Modelling Practice and Theory, p1442-1452, 2009
- [21] MaRS, Fundamentals of Entrepreneurial Management, *“Crafting Your Value Proposition”*
- [22] Susana Nicola, *“Análise de Valor de Negócio”*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Matemática, 2015
- [23] Susana Nicola, *“Negociation”*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Matemática, 2015
- [24] Google Developers Console [Online]. Available: <https://console.developers.google.com> [Acedido até Abril 2015]
- [25] Yahoo! Maps API [Online] Available: <https://developer.yahoo.com/maps/> [Acedido até Abril 2015]
- [26] HERE [Online]. Available: <https://www.here.com> [Acedido até Abril 2015]
- [27] “Maps for developers”, [Online]. Available: <https://developer.here.com/> [Acedido até Abril 2015]
- [28] *“Cross-platform Nokia Maps Here.net service launched”* [Online]. Available: <http://www.ghacks.net/2012/11/14/cross-platform-nokia-maps-here-net-service-launched> [Acedido até Abril 2015]
- [29] OpenStreet Map [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/> [Acedido até Abril 2015]
- [30] LandSat Science [Online]. Available: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/> [Acedido até Abril 2015]
- [31] JmapViewer [Online] Available: <https://www.openhub.net/p/jmapviewer> [Acedido até Abril 2015]
- [32] Gmap.net [Online] Available: <https://greatmaps.codeplex.com/> [Acedido até Abril 2015]
- [33] Mitesh Surej0061, *“Introduction to WPF”*, [Online]. Available: <http://miteshsureja.blogspot.pt/2011/06/introduction-to-wpf.html> [Acedido até Abril 2015]
- [34] *“What is WPF – WPF Tutorial”* [Online]. Available: <http://www.wpf-tutorial.com/about-wpf/what-is-wpf/> [Acedido até Abril 2015]

- [35] D. Hix e H. R. Hartson, "*Developing User Interfaces: Ensuring Usability Through Product & Process*", New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [36] B. W. Boehm, "*A Spiral Model of Software Development and Enhancement*," IEEE Computer, vol. 21, pp. 61-72, 1988.
- [37] Carlo Bernaschina, "*Knockout.js*" [Online]. Available: <https://allocationfailure.wordpress.com/2014/12/20/mvvm-tutorial-wpf-p-1-inotifypropertychanged-hello-world-example/> [Acedido até Abril 2015]
- [38] John, B.E. & Bass, L. (2001), Usability and software architecture, Behaviour and Information Technology, 20(5), pp 329-338
- [39] Ana Freitas, Isabel Praça, Tiago Pinto, Tiago Sousa, Zita Vale. "Network Operator Agent: Endowing MASCEM Simulator with Technical Validation", Communications in Computer and Information Science, vol. 616, pp. 381-392, 2016

Anexo I

Network Operator Agent: Endowing MASCEM Simulator with Technical Validation

Ana Freitas, Isabel Praça¹, Tiago Pinto¹,
Tiago Sousa¹, Zita Vale¹

¹ GECAD – Knowledge Engineering and Decision-Support Research Center, Institute of Engineering
– Politechnic of Porto (ISEP/IPP), Porto, Portugal
{1080598, icp, tmcfp, tabsa, zav}@isep.ipp.pt

Abstract. The actual flexibility of the electricity sector, with a distributed nature and new players, such as the smart grid operator and several types of aggregators, brings new business models and introduces new challenges from the power systems technical operation point of view. In this context, the Network Operator Agent of the Multi-Agent Simulator of Competitive Electricity Markets (MASCEM) plays a crucial role, not only in the scope of the technical validation of the economic transactions established by the market, but also has an agent that can be supporting the grid operation under the scope of a smart grid. A set of new features has been added to the Network Operator making it a “new agent”, bringing a more effective decision support, from the grid technical operation point of view, and achieving its usefulness beyond MASCEM. In this paper the new features are described. A case study is also included to better illustrate the approach and to highlight its usefulness under the scope of a smart grid scenario.

1 Introduction

Over the last decades the electricity sector has been suffering a deep restructuring that started with the privatization and liberalization of previously nationally owned systems [1]. This has brought the competition into the electricity markets, and a set of new mechanisms has been defined [2].

Some tools have emerged to better support electricity sector players to understand and take decisions under the new types of market negotiations. Some of the most well-known tools in this domain are AMES (Agent-based Modeling of Electricity Systems) [3], EMCAS (Electricity Market Complex Adaptive System) [4] and MASCEM (Multi-Agent Simulator of Competitive Electricity Markets) [5].

The optimal power flow analysis is not a recent subject; there are several tools in this domain, such as: PowerWorld [6], CymPower [7] and MatPower [8], a Matlab package. But, the new market rules and the increasing penetration of renewable sources of energy, deeply encouraged by the European environmental policies, that actually are also headline targets of the Europe 2020 strategy for smart, sustainable and inclusive growth [9] imposes the need for a straightforward cooperation between market and power system operators. A way to realize the emerging potential of renewable sources usually distributed and near the consumption sites, is to take an approach that manages these resources as a subsystem according to the new paradigm of Smart Grids [9-10].

MASCEM is one of the most flexible and comprehensive tools that allows the simulation of the market transactions as well as technical analysis of competitive markets under the scope of a smart grid, at a country level and also at an European level [11]. This is achieved by the completeness of its multi-agent model, which includes a strong cooperation between the Market Operator agent and the actual System Operator agent.

This paper addresses recent MASCEM improvements, which led to a restructuring of the System Operator. This agent now becomes a Network operator in the sense that it is not just a Distribution or Transmission System operator, but may also be considered at the smart grid level. Section 2 describes MASCEM multi-agent model, comparing the previous and the new structure of the agent assuring the system technical validation. Section 3 focuses on the description of the Network Operator, its interface and capabilities. In section 4 a smart grid case study is used to highlight the decision support provided by the Network Operator. Finally in section 5 some conclusions are elicited.

2 MASCEM multi-agent model

MASCEM is a multi-agent simulator of competitive electricity markets and it was developed with the purpose of studying the complex and restructured electricity markets. Since its first version in 2003 [5] MASCEM has undergone several improvements [12][13] to become an increasingly comprehensive tool and to accommodate new management models of electricity markets.

MASCEM model includes agents that represent the entities involved in the electricity markets including their interactions, collecting data in the medium and long term to support the decisions of these entities according to their characteristics and objectives, thus allowing better understanding of the behavior, the development of trade relations and the mechanisms of these markets. The simulator uses game theory, learning techniques, scenario analysis and optimization techniques for modeling and supporting market actors in their decisions [13]. Figure 1 illustrates the multi-agent model and market structure of MASCEM.

MASCEM went through a restructuring process, having adopted the JADE (Java Agent Development Framework) [14] framework, mainly due to its support to agents' communications. JADE is a developing environment for agent-based applications, according to the specifications of FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) [15] and fully implemented in JAVA. It ensures a standard of interoperability between multi-agent systems through a comprehensive set of system services, which enable communication between agents. This interoperability brings a lot of further possibilities for MASCEM and for its agents. From the agents point of view it is now possible that they be also part of other models and tools. It also brings MASCEM a new dimension as it may consider in the same simulation bids coming from external agents or tools.

Electricity markets are quite different from other types of markets as the stability of the power system must be assured, thus economical transactions have a strong dependency on the results of the optimal power flow of the electrical grid. In MASCEM the technical analysis of the power flow was assured by the System Operator agent, as mentioned in figure 1.

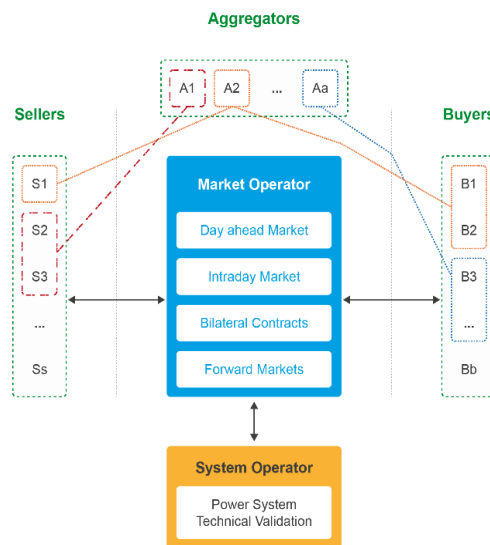


Figure 1 - MASCEM's agents [13]

The role of the System Operator assumes, in the most recent version of MASCEM, a broader role. It becomes a Network Operator (NO) in the sense that it is not only linked to the Transmission System Operator (TSO) or Distribution System Operator (DSO), but may accomplish the technical operation of electrical grids on the scope, for example, of a smart grid. Figure 2 highlights the current MASCEM multi-agent model, enhancing the NO modules and the links with the Market Operator as well as its usefulness abroad MASCEM. NO core modules are the "OPF Algorithms", the environment for the grid definition "Virtual and Geo-location Grids" and a User Interface to make it also useful outside the simulation environment. The "OPF Algorithms" module contains a set of algorithms for the optimal power flow, used to analyze the viability of the economic transactions established at the wholesale market,

and communicated by the Market Operator (MO). The economic dispatch may result in unacceptable flows or voltages in the network, so, NO may need to remove some of the previewed power injection to avoid unacceptable flows.

The scenarios that can be tested with this tool can be related to a real power grid, and thus, based on the geo-location of the grid elements (bus, lines, etc.), or based on virtual grids, this means, scenarios based on grids for test cases. Grids under test may be defined by means of input files or through the user interface, which is quite friendly and easily manipulated. It is worth mentioning that although NO is an agent from MASCEM, it may be used to perform power flow analysis under the scope of other tools, as long as they have communication capability with JADE and respect FIPA regulations.

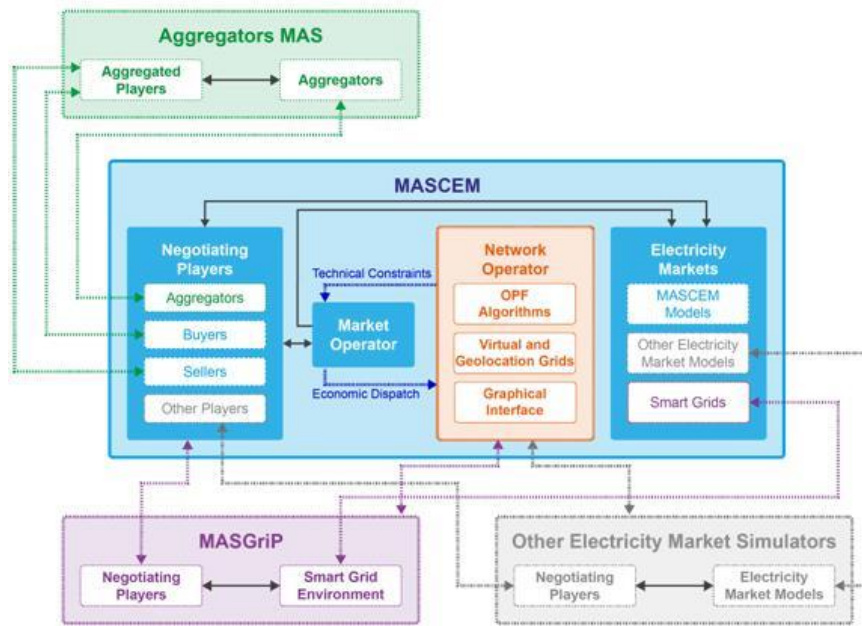


Figure 2 – MASCEM and NO structure

In figure 2, both the link to other simulators and to MASGrIP (Multi-Agent Smart Grid Simulation Platform) [16] highlights this flexibility. MASGrIP is a tool that simulates a smart grid environment, modeling the main involved entities and their interconnections. It was also developed in JADE and it can easily benefit from the NO features at the smart grid level. In this paper we address this “independency” of the actual NO by highlighting the Graphical Interface capabilities and describing the usefulness of this agent in a smart grid scenario.

3 Network Operator Agent

Network Operator Agent (NO) allows the definition and analysis of real and virtual grids. Real grids are those based on the geo-location within a terrestrial map, like the Portuguese transmission grid, while virtual networks aimed at the study of test cases, usually defined to simplify real networks, as those provided, for example, by the IEEE [17]. The NO agent is able not only to create the network to work with, but also to analyze it, and give the instructions to the user of where are the problems in the network.

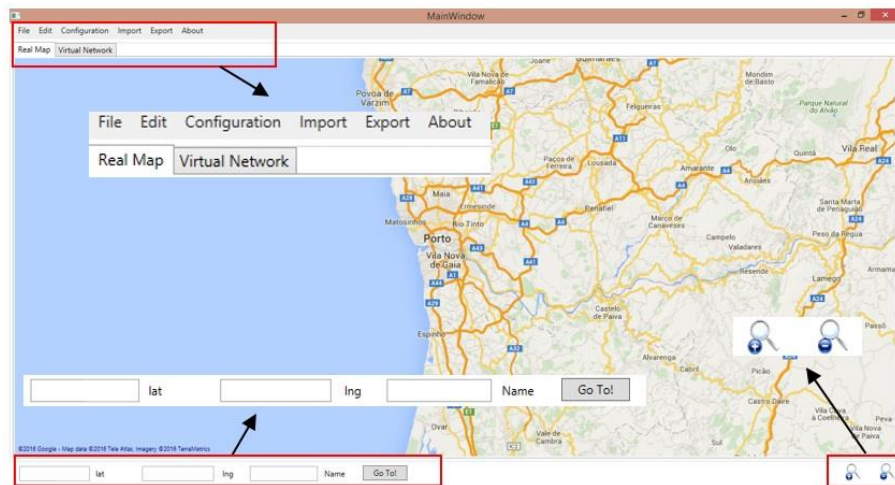


Figure 3 – NO interface for Real networks

NO has a clean interface, with the main area for the grid map. Figure 3 shows the interface. The top selected area shows the application menu and a tab bar. The tab bar contains two options: Real Map (the one selected in figure 3) and Virtual Network. The Real Network option allows the user to create a network on a map based in real geo-location coordinates. The Virtual Network option allows the user to create a network without geo-location coordinates, mainly to allow the analysis of case studies based on simplified grids or case studies based on hypothetical scenarios.

The options on menu bar are:

- File
 - Exit Application;
- Edit
 - Clear Power Grid – Deletes all buses, transmission lines and players defined;
- Configuration
 - New Type Of Player – Types of Players (such as Seller, Buyer, VPP...) are managed by the user. This options allows the user to create new types of Player;
 - Delete Type Of Player – Based on all the types the user has created in the NO, the user can delete one or more types of Player;
- Import
 - Import Grid – Import a network previously created;
 - Import Player Results – To get the market transactions;
 - Import Results – To get Optimal Power Flow (OPF) results ;
- Export
 - Export Grid – Export grid to allow testing different market scenarios without the need to create it again;

The second selected area, on the left bottom, is the navigation area. The user can select geographical coordinates and navigate to them or, for example, search by name of city, country, village, etc. This makes the use of the NO user friendly in defining networks from all over the globe. The third selected area, on the right bottom, contains the zoom controllers. To define a grid, the buses, transmission lines and each player location needs to be specified. After this definition, or by loading a previously defined network, the interface shows all the specified elements. When using the import feature, it is still possible to add new buses, transmission lines and players.

Before the OPF analysis of market transactions, the transmission lines are shown in blue. After, transmission lines will be colored according with the OPF results, based on the transmission lines flow, with red being used when the line becomes congested.

Figure 4 illustrates the same network as figure 3, but with the results of the OPF for a negotiation period. If the line color is red, it means the line cannot support the power flow. If the line is yellow, it means that the line can support, but it is more than 30% of usage and less than 60%. If the color is orange it means that the percentage is between 60% and 100%. And if the line is green, it means the line can support the power flow and it is not close to the maximum.

There are some information icons within each line, with a pop-up window that shows the effective percentage of line usage.

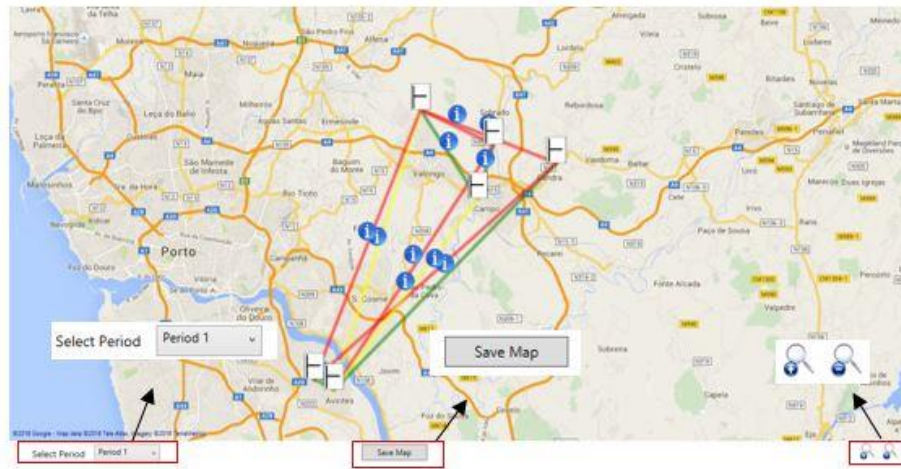


Figure 4 – OPF results for one hour

In figure 4 the three “small areas” at the bottom allow: the left one is to be used to change between periods; the centered one is used for saving the image of the network; and the right one represents the zoom controllers.

4 Case Study

The objective of this case study is to validate the role of MASCEM’s NO agent in electricity market simulations. With this aim a simulated smart grid scenario is considered, including several agents that represent consumers and producers based on real data from Portugal. A smart grid internal market is simulated using MASCEM, which results in a set of purchase and sale amounts of power, referring to each seller and buyer player. The internal smart grid market results are then communicated to MASCEM’s NO agent, so that it validates the power flow in the network lines.

4.1 Characterization

The considered smart grid power network is the 14 bus IEEE test system network [18]. This network is connected to the main grid through a MV/LV transformer. Table I shows the characteristics of the 20 considered power network lines, where each table line represents a network line: the first and second columns are the buses connected by the line; the third column (R p.u.) is the resistance of the line in series; the fourth column (X p.u.) is the inductive impedance in series; the fifth column (B p.u.) is the capacitive impedance in parallel; and the last column (Smax p.u.) is the line maximum capacity.

Table I. Characteristics of the considered power network lines

Bus I	Bus J	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Smax (p.u.)
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	5
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	10
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	5
2	4	0,05811	0,17632	0,034	10
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	10
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	10
4	5	0,01335	0,04211	0	10
4	7	0	0,20912	0	11

4	9	0	0,55618	0	10
5	6	0	0,25202	0	10
6	11	0,09498	0,1989	0	10
6	12	0,12291	0,25581	0	10
6	13	0,06615	0,13027	0	10
7	8	0	0,17615	0	10
7	9	0	0,11001	0	10
9	10	0,03181	0,0845	0	10
9	14	0,12711	0,27038	0	10
10	11	0,08205	0,19207	0	5
12	13	0,22092	0,19988	0	5
13	14	0,17093	0,34802	0	5

The considered smart grid accommodates distributed generation (photovoltaic and coal based generation), provided by 22 producers: 17 are solar based and 5 based on coal generation; and 82 consumers (8 residential houses, 8 residential buildings, each with 8 residential apartments and a common place, and 2 commercial buildings (a bar, which works at night, and a self-service laundry). Each consumer is represented by an independent software agent. Further details on the considered scenario can be consulted in [19].

4.2 Results

The smart grid internal market is simulated in MASCEM, including sale and purchase bids from all the involved players (buyers and sellers) for each of the 24 hourly periods of a simulated day: January 21st 2015, a business day during the winter. Figure 5 presents the total amount of transacted power in each hour, resulting from the market execution of the considered simulation day.



Figure 5 – Hourly market results

From Figure 5 it is visible that, as expected, the smart grid internal market results in a balance between generation and consumption in each hour of the considered day. It can also be seen that in this case the larger amounts of traded power occur during the night, mostly due to the high consumption values of the commercial buildings (especially the bar), as can be seen by Figure 6, which represents bought power of each of the 82 consumers in each hour of the considered simulation day.

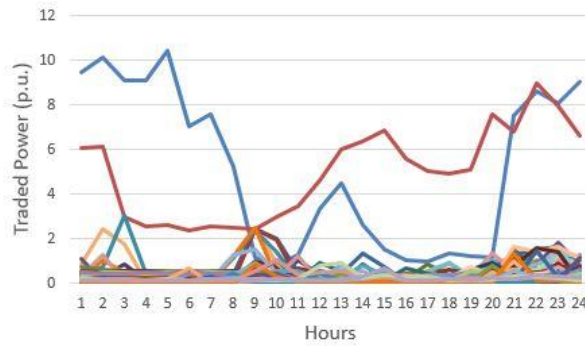


Figure 6 – Consumers profile

From Figure 6 one can clearly distinguish the consumption amount of the two commercial buildings, which is much higher than the residential consumers. It is also visible that the huge amount of consumption of the commercial buildings occurs during the night (the bar is represented by the blue line, and the laundry by the red line). The residential consumers present rather similar consumption profiles.

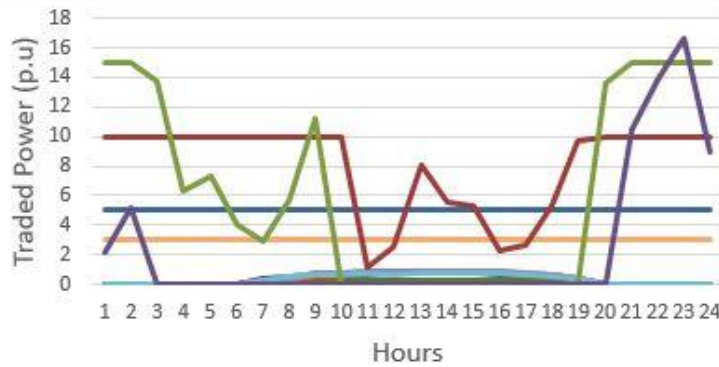


Figure 7 – Generation profiles

Figure 7 shows that the 17 solar based agents present similar generation profiles, as they dependent on the solar intensity in the smart grid location. Therefore the generation of these players achieves higher values during the hours of the day where the sun is more intense, and the production during the night is null. On the other hand, the amount sold by the 5 coal based sellers varies according to the needs in each moment. These 5 players have a maximum generation capacity of 3, 5, 10, 15 and 20 p.u., and the sale prices are lower for the players with lower capacity, and increase as the maximum capacity increases. This means that, in order to meet the demand, the smaller coal based sellers are used first, and the larger ones are only used when the required amount of power increases. For this reason, the larger coal based sellers, purple and green lines in figure 7, do not sell any power during many hours of the day.



Figure 8 – Results of the 11th period

In order to analyze MASCEM's NO role in validating the market transactions through a technical validation of the network, the periods that present the lower and huge amounts of traded power are shown, which are respectively, hour 11 and hour 23, as presented in Figure 5. MASCEM's market results are sent to the NO, which uses the created network to execute the power flow and validate the technical feasibility of the market results. The NO displays the network with an information marker in each line, and changes the color of the line depending on the percentage of the line capacity that is being used, as shown in Figure 8 for the 11th period.

As can be seen from Figure 8, the power flow analyses indicates that there was no congestion in this hour, as can be seen by the line colours. Five lines out of twenty have less than 30% of use (green lines), and all the remaining can support the required power. The information markers shows the percentage of use of the line in two directions: Bus I to Bus J and from Bus J to Bus I.

Figure 9 shows the power flow results, achieved by the NO, regarding the market results of period 23. As shown, in this period, five out of twenty lines become congested. This occurs because the traded amount of power is bigger than the amount the lines can support, which happens because of the huge amount of transacted power verified in the 23rd period (see Figure 5). MASCEM's market operator can use the feedback from the NO to validate and close the market session, or, as in this later case, re-execute the market in order to reach a market solution that respects the network constraints. This is usually done by separating the network into several zones, in order to avoid an excessive amount of power from being sent through critical lines.



Figure 9 – Results for the 23rd period

5 Conclusions

This paper presents MASCEM improvements, regarding the introduction of a flexible and independent Network Operator agent, able to perform the optimal power flow of real or virtual networks. The independency of NO brings the possibility of being used by other simulation tools or even in the analysis of power flow without the market.

A case study based on a smart grid scenario with 82 consumers and 22 producers is presented. Two periods power flow have been analyzed: one for the 11th period, the one with the lower amount of traded power, and another for 23rd period, the one with the huge amount of traded power. Results show that the NO is able to perform the technical validation of the network lines considering the market results, and show this information in a user-friendly way, to ease the interaction with the users. Indeed, these two extreme periods analysis illustrate NO graphical user interface usefulness in understanding what is happening in the simulated scenario. The network technical validation results are also useful information for MASCEM's market operator, so that it can validate the feasibility of the established transactions, or reschedule the market in order to guarantee the viability of the market trades.

References

- [1] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, "Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management", Wiley-IEEE Press, pp. 233-274, 2002.
- [2] L. Meeus, K. Purchalaa, and R. Belmans, "Development of the Internal Electricity Market in Europe", The Electricity Journal, vol. 18, no. 6, pp. 25-35, 2005.
- [3] H. Li, and L. Tesfatsion, "Development of Open Source Software for Power Market Research: The AMES Test Bed", Journal of Energy Markets, vol. 2, no. 2, pp. 111-128, 2009.
- [4] V. Koritarov, "Real-World Market Representation with Agents: Modeling the Electricity Market as a Complex Adaptive System with an Agent-Based Approach", IEEE Power&Energy, pp.39-46, 2004
- [5] Isabel Praça, Carlos Ramos, Zita Vale, Manuel Cordeiro, "MASCEM: A Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets", IEEE Intelligent Systems, vol. 18, n° 6, pp. 54-60, Special Issue on Agents and Markets, November-December, 2003, doi: 10.1109/MIS.2003.1249170.
- [6] Power World. <http://www.powerworld.com/>. Last access: January 2016.
- [7] CYME Power Engineering Software. <http://www.cyme.com/software/>. Last access: January 2016.
- [8] Ray D. Zimmerman, et.al. "MATPOWER - A MATLAB Power System Simulation Package". Available at: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>. Last access: January 2016.
- [9] European Commission, "The 2020 climate and energy package". Available at http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.htm. Last access: January 2016.
- [9] Electricity Advisory Committee, "Smart Grid: Enabler of the New Energy Economy", December, 2008
- [10] B. M. Buchholz and Z. Styczynski, Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014.
- [11] Tiago Pinto, Hugo Silva, Zita Vale, Gabriel Santos, Isabel Praça, "Pan-European Electricity Market Simulation considering the European Power Network capacities", Fourth International Workshop on Artificial Intelligence Techniques for Power Systems and Energy Markets (IATEM 2015) at the 26th International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2015), Valencia, Spain, 1 – 4 September, 2015.
- [12] Tiago Pinto, Hugo Morais, Pedro Oliveira, Zita Vale, Isabel Praça, Carlos Ramos, "A new approach for multi-agent coalition formation and management in the scope of eletricity markets", Energy, vol. 36, no. 8, pp. 5004-5015, August 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.05.045.
- [13] Gabriel Santos, Tiago Pinto, Hugo Morais, Tiago M. Sousa, Ivo F. Pereira, Ricardo Fernandes, Isabel Praça, Zita Vale, "Multi-Agent Simulation of Competitive Electricity Markets: Autonomous systems cooperation for European Market modeling", Energy Conversion and Management, vol. 99, pp. 387-399, July 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.04.042.
- [14] JADE - Java Agent DEvelopment Framework, homepage: <http://jade.tilab.com/>. Last access: January 2016.
- [15] Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA), Agent Management Specification, 2002. Available: <http://www.fipa.org/specs/fipa00023/SC00023J.html>. Last access: January 2016.
- [16] Pedro Oliveira, Tiago Pinto, Hugo Morais, Zita Vale, "MASGriP – A Multi-Agent Smart Grid Simulation Platform", IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012, San Diego CA, USA, July 22 - 26, 2012, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345649.
- [17] Power Flow Cases. Available: <http://publish.illinois.edu/smartergrid/>. Last access: January 2016.
- [18] "14 bus IEEE test system network", <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Accessed on January 2016.
- [19] Canizes,B.,et.al "Resource Scheduling in Residential Microgrids Considering Energy Selling to External Players", Power Systems Conference (PSC 2015), South Carolina, USA, 10-13 March, 2015

